

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РУДИК АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.317.08

**НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ПРИЛАДОВОЇ  
СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ МОБІЛЬНОГО РОБОТА**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: Заслужений метролог України,  
доктор технічних наук, професор  
**КВАСНІКОВ Володимир Павлович**,  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних  
систем та технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович**,  
Одеська державна академія технічного  
регулювання та якості, ректор;

доктор технічних наук, професор  
**ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович**,  
Житомирський державний технологічний університет,  
завідувач кафедри метрології та інформаційно-  
виміральної техніки;

доктор технічних наук, доцент  
**МАТІКО Федір Дмитрович**,  
Національний університет "Львівська політехніка",  
доцент кафедри теплоенергетики, теплових і  
атомних електричних станцій.

Захист відбудеться "26" червня 2018 р. о 14<sup>30</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "26" травня 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ю.В. Киричук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Слово “робот” має слов’янське походження, і на даний час під поняттям “робот” розуміють будь-яку автоматичну машину, що замінює людину і нагадує його розумну поведінку. Предметом робототехніки є створення і використання роботів та інших засобів робототехніки й основаних на них технічних систем і комплексів різного призначення.

Більшість мобільних роботів (МР) розробляється для роботи у шкідливих чи небезпечних для людини умовах, які виникають при ліквідації наслідків аварій, при розмінуванні або при роботі на інших планетах, що дозволяє уникнути людських жертв. Тому актуальною є проблема створення мобільних робототехнічних комплексів (МРТК), здатних за допомогою інтелектуальної системи керування автономно виконувати поставлену задачу при мінімальному втручанні людини.

Мобільний робот не прив’язаний до оператора, здатний переміщуватися в робочому середовищі відповідно до програми керування і може бути оснащений маніпулятором. Умови функціонування МР визначаються типом середовища їх експлуатації та характером робочого процесу і діляться на дві категорії: детерміновані та недетерміновані. Детермінованими є середовища, спроектовані і створені людиною, а їх детермінованість обумовлена апіорним знанням точного положення всіх об’єктів, з якими може взаємодіяти робот.

Для надійного керування МР його система керування має отримувати сигнали від різних сенсорів, в результаті обробки яких визначаються поточні координати робота, його швидкість і прискорення, а також орієнтація у просторі (кути курсу, тангажу і крену). На даний час основними типами таких сенсорів є інерціальні (акселерометри, гіроскопи, магнітометри), локаційні (ультразвукові, радарні, лідарні) і відео (моно- та стереокамери), а інерціальні технології використовуються не тільки в традиційній галузі навігації та керування рухом, але й в геодезії, гравіметрії, метрології, логістиці та ін., при цьому мікромеханічні інерціальні сенсори є основною елементною базою для створення мініатюрних інерціальних навігаційних систем (ІНС).

Галузі використання мікромеханічних інерціальних сенсорів постійно розширюються через їх малі габаритні розміри, енергоспоживання і собівартість, формуючи новий сегмент ринку мініатюрних безплатформних ІНС (БІНС). Мікромеханічні акселерометри забезпечують широкий діапазон вимірювань і мають точнісні характеристики ІНС середнього класу. Однак вимоги до точності інерціальних сенсорів та систем на їх основі при розв’язанні задач навігації та орієнтації ускладнюються, що приводить до необхідності вдосконалення методів їх випробувань для отримання достовірних математичних моделей показів, які враховують умови експлуатації.

Дослідження в області розвитку методів і систем навігації та керування МР проводяться в багатьох наукових центрах України – в НТУУ КПІ ім. І. Сікорського, КНУ ім. Т. Шевченка, НАУ, НУ «Львівська політехніка», НАУ ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», а також в університетах США (Carnegie Mellon University, Stanford University), Великобританії (University of Oxford), Німеччини (University of Bonn), Франції (INRIA), Австралії (The University of Sidney), Росії (МДТУ ім. Баумана, Інститут прикладної математики ім. М.В. Келдиша РАН, ЦНДІ робототехніки, Інститут проблем механіки РАН та МДТУ «Станкін») й інших країн.

Вони базуються на роботах науковців В.П. Кваснікова, А.А. Голована, В.В. Матвєєва, В.Н. Тяпкіна, І.В. Щербаня, О.А. Степанова, П.Д. Грувса, М.С. Грювала, О.Дж. Вудмана, І.Є. Лисенка, Л.К. Самойлова, В.Я. Суп'яна, а також наукових колективів під керівництвом О.М. Безвесільної, Є.І. Юрєвича, Ю.В. Подураєва та А.С. Ющенко.

Розроблені на даний час методи і засоби вимірювання прискорення не є достатньо ефективними для розв'язання задач вимірювання параметрів руху об'єктів з достатньою точністю в складних кліматичних умовах та при дії різних дестабілізуючих факторів. Більшість з них характеризуються складністю, недостатніми швидкістю та точністю, а також недосконалістю математичного і програмного забезпечення. Тому постає питання необхідності вдосконалення приладових систем вимірювання прискорення МР, розробки нових і удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних про параметри руху на фоні шумів і завад різного роду.

Науково-прикладна проблема полягає у необхідності подальшого розвитку теорії та принципів побудови приладових систем вимірювання прискорення МР, здатних забезпечити високу точність вимірювання та достатню швидкість при дії на приладову систему шумів і завад різного роду.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій, відповідно до Закону України № 3715-VI «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні», зокрема, за напрямом «Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки», а також відповідно до держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі № 125-ДБ17 «Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-вимірювальних систем» (номер держреєстрації 0117U002367).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої проблеми розробки наукових основ створення приладової системи вимірювання прискорення МР за рахунок розробки нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних про параметри руху на фоні шумів і завад різного роду.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

1. Провести аналіз існуючих методів і засобів вимірювання (ЗВ) прискорення МР при впливі різних дестабілізуючих факторів та систематизувати відомі теоретичні підходи, що покладено в основу їх побудови.

2. Розвинути теоретичні засади методів вимірювання прискорення МР та проаналізувати способи підвищення їх точності в залежності від впливу робочих умов (середовища).

3. Деталізувати узагальнене рівняння похибок акселерометрів БІНС та модель похибок БІНС при визначенні швидкості і координат МР, проаналізувати складові випадкової похибки акселерометрів та навести моделі їх формування з білого шуму та білої послідовності.

4. Розробити методику оцінки похибок БІНС на короткому часовому інтервалі за значеннями інструментальних похибок інерціальних сенсорів без моделювання

алгоритму інерціальної системи.

5. Розробити методику оцінки мінімального значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення і визначення оптимального часу усереднення для калібрування інерціальних сенсорів.

6. Розробити вимірювальні перетворювачі та пристрої обробки сигналів ємнісних мікроелектромеханічних сенсорів приладових систем МР і алгоритми їх роботи.

7. Розробити методику вибору частоти дискретизації сигналів сенсорів і виконавчих пристроїв в системі керування МР з врахуванням їх структурних зв'язків для отримання оптимальної програми опитування.

8. Розробити схеми електричних фільтрів та алгоритми фільтрації сигналів в приладових системах вимірювання прискорення МР для отримання оцінок навігаційних параметрів, "очищених" від завад.

9. Провести експериментальні дослідження розроблених вимірювальних перетворювачів та засобів вимірювання для підтвердження адекватності розроблених теоретичних моделей, ефективності запропонованих методів та створених на цій основі приладових систем вимірювання прискорення МР.

10. Розробити, навчити та проаналізувати штучну нейронну мережу (ШНМ) МР для визначення відстані до перешкоди, яка найкраще враховує характер і складність взаємозв'язку між інформаційними параметрами.

11. Впровадження результатів досліджень.

**Об'єктом дослідження** є процес вимірювання прискорення МР за допомогою його приладової системи, реалізованої на основі розроблених нових та удосконалених існуючих методів і засобів вимірювання.

**Предметом дослідження** є методи і засоби вимірювання прискорення МР з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних про параметри руху на фоні шумів і завад різного роду.

### **Методи досліджень**

Для досягнення поставленої мети використано такі методи досліджень:

- аналіз теоретичних основ і принципів побудови існуючих методів і засобів вимірювання прискорення та впливу дестабілізуючих факторів (розділ 1);

- методи статистичної обробки даних (визначення параметрів руху об'єкта на інтервалі часу) і результатів експерименту (дослідження степеню впливу групи кліматичних факторів на точність оцінки швидкості ультразвуку в повітрі), а також методи аналізу функцій (розкладання функції в ряд Тейлора при аналізі математичної моделі впливу робочих умов на коефіцієнт чутливості ЗВ) (розділ 2);

- методи теорії випадкових процесів, методи математичного моделювання, частотний (за спектральною густиною потужності) та часовий (за варіаціями Алана) методи аналізу випадкових похибок акселерометрів, методи ідентифікації структури шумів в каналах ЗВ (розділ 3);

- методи вимірювання ємності МЕМС (мікроелектромеханічна система) сенсорів та її відхилення від номінального значення, методи вимірювання амплітуди сигналу та відношення амплітуд, методи оптимізації частоти дискретизації при реалізації оптимальної програми опитування сенсорів (розділ 4);

- методи фільтрації (лінійної, гарантованої, оптимальної) сигналів в приладових системах вимірювання прискорення, спектральний (швидке перетворення Фу-

р'є) і часовий методи аналізу нестабільності вихідного сигналу фільтра та амплітудних і фазових флуктуацій, методи фізичного та математичного моделювання з широким використанням пакетів прикладних програм та інженерно-обчислювальних комплексів *MATLAB* та *NI Multisim* з метою створення віртуальних приладів для перевірки теоретичних рішень (розділ 5);

- методи автоматизованого проектування за допомогою САПР *OrCAD* (для розробки фізичних моделей вимірювальних перетворювачів (ВП) і ЗВ), методи фізичного і математичного моделювання для аналізу вихідних сигналів сенсорів і якісних характеристик приладових систем, а також методи теорії ШНМ для підвищення точності і швидкодії приладової системи МР (розділ 6).

**Достовірність** наукових результатів, висновків та рекомендацій підтверджено вибором апробованих методів досліджень, цифровим моделюванням на ПК, збігом результатів експериментів з відомими експериментальними даними інших досліджень, відповідністю отриманих теоретичних та експериментальних результатів.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

Найбільш суттєві результати отримані автором особисто і визначаються такими положеннями:

- отримав подальший розвиток метод визначення параметрів руху МР, згідно з яким загальна кількість координат об'єкта на інтервалі часу ділиться на групи з однаковою кількістю координат, а коди координат в групах усереднюються; одержана кількісна оцінка ефективності методу залежно від кількості використовуваних для обчислень координат;

- вперше запропоновано математичну модель впливу робочих умов (середовища) на коефіцієнт чутливості ЗВ; проаналізовано відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ від номінального значення залежно від групи факторів та кількості членів розкладу функції в ряд Тейлора;

- вперше отримано математичну модель залежності швидкості ультразвуку в повітрі від групи кліматичних факторів та швидкості вітру; з'ясовано, що на ультразвуковий сигнал суттєво впливає зміна температури повітря, а також менш значуще атмосферний тиск і відносна вологість;

- деталізовано узагальнене рівняння похибок акселерометрів БІНС і складено блок-схему формування похибок у вихідному сигналі акселерометрів; проаналізовано складові випадкової похибки акселерометрів та наведено моделі формування складових випадкової похибки з білого шуму та білої послідовності;

- отримала подальший розвиток методика оцінки похибок БІНС на короткому часовому інтервалі за значеннями інструментальних похибок інерціальних сенсорів без моделювання алгоритму ІНС; доведено, що МЕМС-гіроскопи з часом накопичують значно більші похибки визначення параметрів руху і орієнтації порівняно з акселерометрами такого самого класу точності;

- отримала подальший розвиток методика оцінки мінімального значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення і визначення оптимального часу усереднення, що важливо при калібруванні інерціальних сенсорів і дозволяє ефективно ідентифікувати структуру шумів в каналі ЗВ;

- деталізовано модель похибок БІНС при визначенні швидкості і координат МР; доведено, що точність визначення лінійних швидкостей і координат визначається

похибками орієнтації, а величина похибок БІНС залежить від динаміки руху об'єкта;

- вперше запропоновано визначати параметри ємнісних МЕМС-сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів, за результатами вимірювань кута фазового зсуву між двома напругами на виході ВП та відношення амплітуд цих напруг (схеми ВП захищені патентами України на винахід №57135 і №57836);

- отримав подальший розвиток фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги, який в роботі використовується для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг; похибки розроблених ЗВ в основному визначаються точністю вимірювання (або перетворення) часових інтервалів;

- удосконалено методику вибору частоти дискретизації сигналів сенсорів і виконавчих пристроїв в системі керування МР з врахуванням їх структурних зв'язків, що дозволяє знаходити оптимальні значення частот дискретизації сигналів та отримати оптимальну програму опитування;

- вперше розроблено методику визначення параметрів паразитної фазової модуляції при модуляції амплітуди вхідного сигналу смугового фільтра за різними законами при його розстроюванні.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

- складено бюджет похибок визначення псевдодальності, псевдошвидкості і псевдоприскорення за допомогою супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) і з'ясовано потенційні значення їх сумарних похибок (6.3 м, 0.09 м/с та 0.0238 м/с<sup>2</sup>);

- розроблено математичні моделі МЕМС акселерометра в різних формах і експериментально доведено, що використання "індивідуальних" моделей сенсора підвищує точність визначення прискорення у (1.5÷3.5) рази порівняно з паспортними даними;

- розроблено нові пристрої обробки сигналів ємнісних МЕМС сенсорів приладових систем МР на основі генераторного нульового методу, в яких підвищується стійкість до впливу шумів і забезпечується висока чутливість та часткова компенсація температурних змін вихідної частоти;

- вдосконалено схему аналогового смугового фільтра (СФ) для ефективного придушення завади на 40 дБ при розстроюванні фільтра не більше ніж на октаву та проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади фільтра від розкиду параметрів всіх елементів схеми;

- запропоновано використовувати медіанний та діагностичний фільтри на основі алгоритмів гарантованої фільтрації при попередній обробці сигналів сенсорів бортової навігаційної системи МР для отримання оцінок навігаційних параметрів, "очищених" від завад;

- визначено умови мінімізації випадкової похибки на виході комплексованої інерціальної системи орієнтації, отримано варіант чисельної реалізації комплементарного фільтра інерціального вимірювального модуля (ІВМ) та синтезовано оптимальний ФНЧ з лінійною ФЧХ на базі КІХ-фільтра другого типу;

- розроблено два варіанти реалізації інерціальних мікросистем орієнтації на основі фільтра Калмана (для контуру керування МР і для резервної системи), що мають високі технічні характеристики і показали стійке функціонування при тривалій експлуатації (5 год. і більше);

- розроблено ультразвуковий далекомір системи технічного зору МР, в якому

точність оцінки параметрів руху підвищується за рахунок врахування показань сенсорів кліматичних параметрів;

- розроблено, навчено і проаналізовано оптимальну структуру ШНМ типу *Cascade-forward* з двома прихованими шарами для визначення відстані МР до перешкоди, яка найкраще враховує характер і складність взаємозв'язку між інформаційними параметрами і на тестувальній вибірці показала високу точність (похибки середньоквадратична  $MSE=1.412$  мм і середня абсолютна  $MAE=1.892$  мм);

- розроблено методику визначення корегувальних коефіцієнтів для ІВМ та магнітометра, що визначаються під час калібрування і використовуються при інтеграції до програмного коду обчислювача для визначення їх вихідних сигналів;

- розроблено локальну навігаційну систему (ЛНС), забезпечувана точність визначення параметрів руху і кутів орієнтації МР якої дозволяє використовувати її як автономно для контролю маневрів при переміщенні за безпечним маршрутом протягом коротких інтервалів часу, так і в комплексі з іншими навігаційними пристроями (похибка визначення координат об'єкту в автономному режимі 1.2 м за 10 с при прямолінійному переміщенні та 2.2 м за 10 с при маневруванні; похибка відпрацювання кутів орієнтації  $(0.1\div 0.3)^\circ$  для кутів крену і тангажу та  $(2\div 3)^\circ$  для кута курсу).

**Впровадження результатів роботи.** Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємствах ДП “Завод 410 цивільної авіації”, ПАТ НВО “Київський завод автоматики”, ТзОВ фірма “Вестра” (м. Рівне) та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті (м. Київ) при викладанні дисциплін “Фізичні основи сучасної метрології” і “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка” та в Національному університеті водного господарства та природокористування (м. Рівне) при викладанні дисциплін “Електроніка та мікропроцесорна техніка”, “Проектування пристроїв автоматизації” і “Метрологія, технологічні вимірювання та прилади”, що підтверджено відповідними актами.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено трьома патентами України на винахід №57135, №57795 та №57836.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення та результати, винесені на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність і обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально і моделюванням на ЕОМ.

Особистий внесок здобувача у праці, опубліковані у співавторстві: [1] – розділи 3 та 4 підготовлені здобувачем, а розділи 1 і 2 – спільно авторами; [8] – розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача основних параметрів високочастотних резонансних контурів; [9] – запропоновано резонансний метод вимірювання добротності варикапів і проведена експериментальна перевірка отриманих результатів; [10] – запропоновано вимірювальні перетворювачі основних параметрів паралельних та послідовних резонансних контурів; [11] – уточнено коефіцієнти передавальної функції і доведено можливість придушення завади більше 40 дБ; [12] – проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади фільтра від розкиду параметрів елементів та їх температурних коефіцієнтів; [16] – проаналізовано відхилення коефіцієнта чутливості засобу вимірювання від номінального значення залежно від групи факторів та кількості членів розкладу функції в ряд Тейлора; [18] – про-



ведено оцінку параметрів “індивідуальної” електричної моделі МЕМС-акселерометра і доведена її адекватність; [19] – проведено числові оцінки похибок каналу БІНС, реалізованого на інерціальних МЕМС-сенсорах низького класу точності; [20] – проаналізовано похибки визначення резонансної частоти і смуги пропускання високодобротних ємнісних МЕМС-сенсорів; [21] – запропоновано методику калібрування магнітометра і визначено параметри його моделі з подальшою інтеграцією до програмного коду; [28] – запропоновано реальну передавальну функцію фільтра замінити еквівалентною, яка визначає фазові флуктуації відфільтрованого сигналу; [29] – запропонована методика оцінки точності вимірювань для випадку, коли немає можливості проводити багатократні вимірювання; [32] – запропоновано метод вимірювання шумових параметрів мал шумливих операційних підсилювачів з польовими транзисторами на вході; [33] – запропоновано за допомогою фільтра Калмана визначити статистичні характеристики паразитних сигналів, діючих в процесі вимірювання; [34] – проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади смугового фільтра від розкиду параметрів елементів схеми; [37] – запропоновано визначати параметри руху об’єкту при розкладанні функції переміщення на заданому часовому інтервалі в ряд Фур’є; [40] – розроблено пристрій обробки сигналів ємнісних мікромеханічних перетворювачів, реалізований за генераторним нульовим методом; [46] – запропоновано методику аналізу похибок відтворення сигналу фільтром синтезу ЦАП і чисельний аналіз складових таких похибок; [47] – запропоновано варіанти побудови помножувачів частоти, у вихідній напрузі яких відсутні паразитні амплітудна і фазова модуляції; [48] – отримано співвідношення для визначення параметрів паразитної фазової модуляції при амплітудній модуляції вхідного сигналу; [49] – проаналізовано складові додаткової похибки вимірювання носійної частоти сигналу з амплітудно-імпульсною модуляцією; [50] – запропоновано метод оцінки параметрів стану системи в “офарбованих” шумах практично без збільшення часу обчислень.

**Апробація результатів дисертації.** Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на таких наукових конференціях і семінарах: 4<sup>а</sup> НТК «Прогресивні матеріали, технології та обладнання в приладобудуванні» (м. Тернопіль, 2000 р.); 6<sup>а</sup> міжнародна НТК «Контроль і управління в складних системах» (м. Вінниця, 2001 р.); 1<sup>а</sup>, 6<sup>а</sup> міжнародні НТК «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування» (м. Вінниця, 2005 р., 2017 р.); 8<sup>а</sup> міжнародна НПК «Наука і освіта» (м. Дніпропетровськ, 2005 р.); 7<sup>а</sup> міжнародна НПК «Найновітє постиження на європейската наука» (м. Софія, 2011 р.); 5<sup>а</sup>, 6<sup>а</sup>, 7<sup>а</sup>, 9<sup>а</sup>, 10<sup>а</sup> міжнародні НПК «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ, 2012 р., 2013 р., 2014 р., 2016 р., 2017 р.); 6<sup>а</sup> міжнародна НПК «Авіа-2013» (м. Київ, 2013 р.); 1<sup>а</sup> міжнародна НПК «Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка» (м. Рівне, 2016 р.); 7<sup>th</sup> world congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in Aviation and Space Technologies» (Kyiv, Ukraine, 2016); 16<sup>а</sup>, 17<sup>а</sup> міжнародні НТК «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Одеса, 2016 р., 2017 р.); 8<sup>а</sup> міжнародна НПК «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, 2016 р.); 10<sup>а</sup> міжнародна НТК «Метрологія та вимірювальна техніка» (м. Харків, 2016 р.); 6<sup>а</sup> міжнародна НПК «Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи» (м. Одеса, 2016 р.); 4<sup>а</sup> міжнародна НТК «Ви-

мірювання, контроль і діагностика в технічних системах» (м. Вінниця, 2017 р.). Також результати роботи доповідались на наукових семінарах кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету та науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу і студентів Національного університету водного господарства та природокористування за участю інженерно-технічних працівників підприємств м. Рівне та області.

**Публікації.** Основні положення дисертаційного дослідження опубліковані дисертантом самостійно та у співавторстві у 55 наукових працях, у тому числі в одній монографії (у співавторстві), 20 статтях у наукових фахових виданнях (з них 10 одноосібних, а 5 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України, зареєстрованих у міжнародних наукометричних базах), 3 патентах України на винахід (одноосібно), 21 публікації в інших виданнях (з них 14 одноосібних), таких як матеріали і тези доповідей на конференціях (праці апробаційного характеру), а також 10 статтях у інших виданнях (з них 5 одноосібних, а 4 статті опубліковано у наукових виданнях України, зареєстрованих у міжнародних наукометричних базах).

**Структура та загальний обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 460 сторінок. Основний зміст викладено на 357 сторінках, який містить 105 рисунків і 22 таблиці. Список використаних джерел по розділах становить: розділ 1 – 71 джерело, розділ 2 – 57 джерел, розділ 3 – 49 джерел, розділ 4 – 55 джерел, розділ 5 – 54 джерела, розділ 6 – 37 джерел.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні задачі досліджень, показано зв'язок обраного напрямку з науковими програмами, планами, темами, сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію та впровадження результатів досліджень.

Показано, що наукова проблема, яка розв'язується в роботі, є актуальною для різних галузей промисловості та господарства України, включаючи такі провідні, як приладобудування, машинобудування і транспорт, нафтогазовидобування, сільське господарство та ін., де на практиці використовуються засоби для вимірювання прискорення та інших параметрів переміщення і орієнтації у просторі. Тому її розв'язання дасть можливість скоротити часові та фінансові витрати при створенні та експлуатації нових більш ефективних приладів, механізмів, машин та технологій.

**У першому розділі** розглянуто характеристики прискорення як вимірюваної величини, розглянута модель абсолютного прискорення об'єкту  $\vec{a}_{a.g}$ , що переміщується по поверхні Землі або навколо неї (в супровідному базисі), а також показано, що вектор прискорення можна представити в проекціях на осі різних систем координат (інерціальної ( $i$ ), земної ( $e$ ), географічної ( $g$ ), зв'язаної ( $b$ )) за допомогою відповідних матриць переходу  $C_m^n$ , де  $m$  та  $n$  – символи систем координат.

Проведено аналіз відомих методів вимірювання прискорення, серед яких виділено класичний, інерціальної навігації (платформні та безплатформні), одометричні (на енкодерах і візуальні), локаційні (ультразвукові, радарні та лідарні), радіонавіга-

ційні (варіанти дальномірного і доплерівського методів) та інтегровані. За проведеним аналізом розроблено класифікацію методів вимірювання прискорення (рис. 1).

Розглянуто основні технічні параметри і характеристики акселерометрів та представлено порівняльний аналіз різних технологій акселерометрів. Для задач мобільної робототехніки найкращими на даний час за характеристиками є поверхневі емнісні акселерометри. На основі проведеного огляду сучасного стану і технологій виробництва акселерометрів представлена їх класифікація (рис. 2).

На даний час підвищується як попит на сенсори для систем навігації, так і характеристики нових пристроїв – точність, надійність, компактність, економічність, інтелектуальність, зменшення ціни компонентів (при зменшенні загальної ціни сучасної системи на їх основі та кількості зовнішніх дискретних елементів).

В розвитку технології MEMS актуалізується тенденція розміщення в одному інтегральному корпусі і, за можливістю, на одному кристалі, мікромеханічних та мікроелектронних пристроїв, сенсорів температури, схем обробки та пристроїв, що виконують мікрооптичні функції. Подальша еволюція MEMS буде полягати в інтеграції виконавчих елементів, сенсорів тиску, магнітного поля та ін. При вірному врахуванні властивостей та особливостей акселерометра, характерних для даної технології, можна значно підвищити технічні параметри навігаційної системи МР, що характеризують його здатність детектувати нахил, рух, положення, вібрацію та удар.



Рис. 1. Класифікація методів вимірювання прискорення

Проведено якісний аналіз впливу дестабілізуючих факторів, таких як кліматичні (температура, тиск, вологість), шуми, завади і вібрації, на процес вимірювання прискорення локаційними, радіонавігаційними та інерціальними методами.

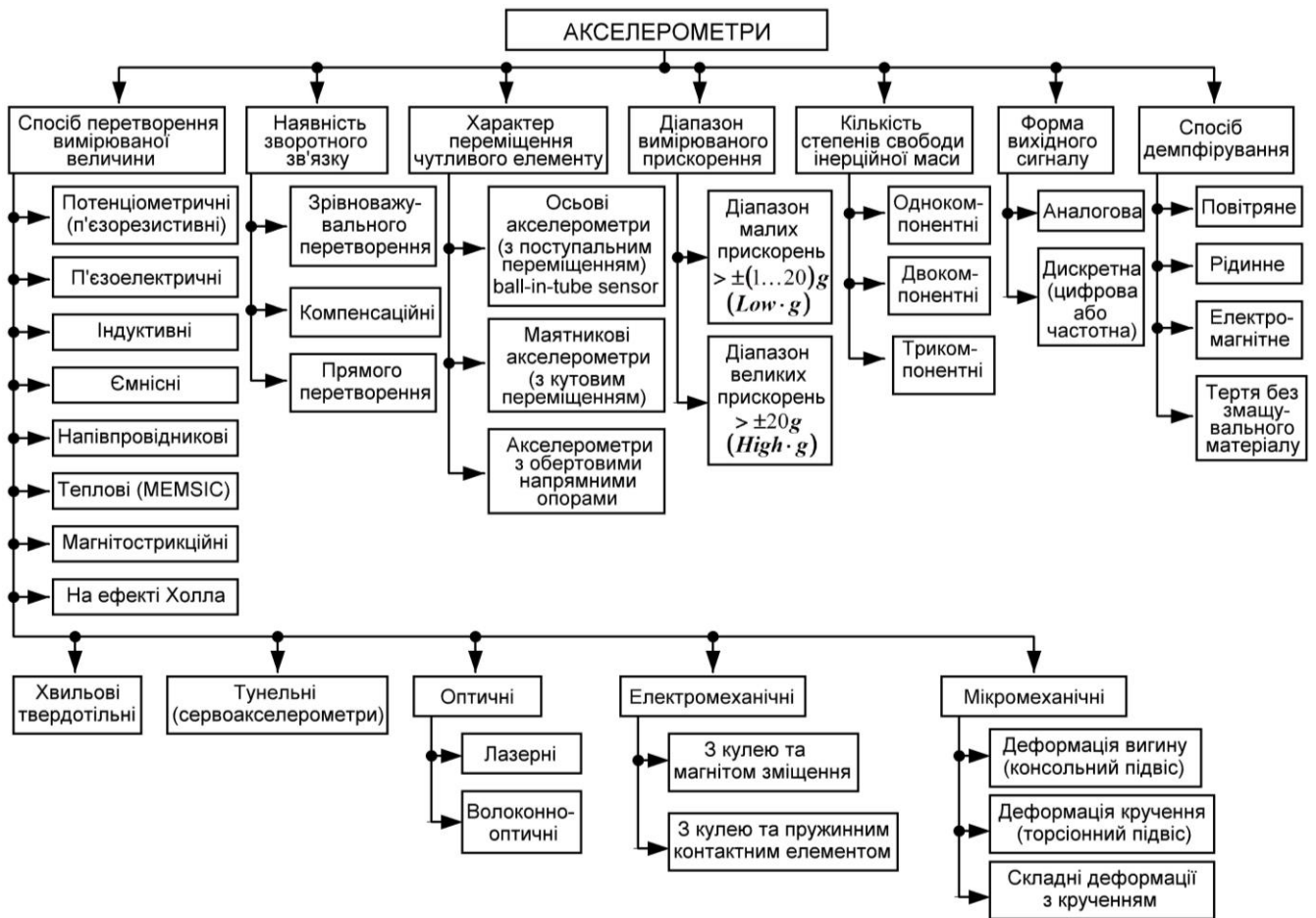


Рис. 2. Класифікаційні ознаки акселерометрів

У другому розділі розвинуто теоретичні засади методів вимірювання прискорення мобільних роботів та проаналізовано способи підвищення їх точності.

Показано, що для визначення параметрів руху об'єкта (швидкості, прискорення та різкості) необхідна інформація про його координати. Для підвищення точності визначення параметрів руху запропоновано загальну кількість координат об'єкта на інтервалі часу ділити на групи з однаковою кількістю координат (дві для швидкості, три для прискорення і чотири для різкості), визначати середнє арифметичне координат в групах і за цими результатами визначати середні значення параметрів руху об'єкта на заданому часовому інтервалі.

Згідно даного методу похибки визначення середніх значень швидкості  $\varepsilon_{V_{cep\Sigma}}$ , прискорення  $\varepsilon_{a_{cep\Sigma}}$  і різкості  $\varepsilon_{r_{cep\Sigma}}$  запропонованим способом та відповідних їм середньоквадратичні відхилення (СКВ)  $\sigma[\varepsilon_{V_{cep\Sigma}}]$ ,  $\sigma[\varepsilon_{a_{cep\Sigma}}]$  та  $\sigma[\varepsilon_{r_{cep\Sigma}}]$  визначаються так:

$$\varepsilon_{V_{cep\Sigma}} = \frac{\Delta_{V_{cep\Sigma}}}{(V_{cep\Sigma})_{\max}} = \frac{4K \cdot \Delta \left( \sum_{i=\frac{m}{2}+1}^m N(t_i) - \sum_{i=1}^{\frac{m}{2}} N(t_i) \right)}{(V_{cep})_{\max} m \Delta t} = \frac{4K \cdot \sum_{i=1}^m \Delta_{N(t_i)}}{(V_{cep})_{\max} m(m-1)T}; \quad (1)$$

$$\sigma[\varepsilon_{V_{cep\Sigma}}] = \frac{4K \sqrt{m} \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{(V_{cep})_{\max} m \Delta t} = \frac{4K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{\sqrt{m} (m-1)T (V_{cep})_{\max}}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_{a_{cep\Sigma}} = \frac{27K \cdot \Delta \left( \sum_{i=\frac{2m}{3}+1}^m N(t_i) - 2 \cdot \sum_{i=\frac{m}{3}+1}^{\frac{2m}{3}} N(t_i) + \sum_{i=1}^{\frac{m}{3}} N(t_i) \right)}{(a_{cep})_{\max} m(\Delta t)^2} = \frac{108K \cdot \sum_{i=1}^m \Delta_{N(t_i)}}{m^2(m-1)^2 T^2 (a_{cep})_{\max}}; \quad (3)$$

$$\sigma[\varepsilon_{a_{cep\Sigma}}] = \frac{108K \sqrt{m} \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{m^2(\Delta t)^2 (a_{cep})_{\max}} = \frac{108K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{\sqrt{m} m(m-1)^2 T^2 (a_{cep})_{\max}}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{r_{cep\Sigma}} = \frac{\Delta_{r_{cep\Sigma}}}{(r_{cep\Sigma})_{\max}} = \frac{256K \cdot \frac{9}{m^2} \sum_{i=1}^m \Delta_{N(t_i)}}{m(\Delta t)^3 (r_{cep})_{\max}} = \frac{2304K \cdot \sum_{i=1}^m \Delta_{N(t_i)}}{m^3(m-1)^3 T^3 (r_{cep})_{\max}}; \quad (5)$$

$$\sigma[\varepsilon_{r_{cep\Sigma}}] = \frac{2304K \sqrt{m} \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{m^3(\Delta t)^3 (r_{cep})_{\max}} = \frac{2304K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{\sqrt{m} m^2(m-1)^3 T^3 (r_{cep})_{\max}}. \quad (6)$$

де  $\Delta_{V_{cep\Sigma}}$ ,  $\Delta_{a_{cep\Sigma}}$ ,  $\Delta_{r_{cep\Sigma}}$  – абсолютні похибки визначення швидкості, прискорення і різкості;  $(V_{cep\Sigma})_{\max} = (V_{cep})_{\max}$ ,  $(a_{cep\Sigma})_{\max} = (a_{cep})_{\max}$ ,  $(r_{cep\Sigma})_{\max} = (r_{cep})_{\max}$  – максимальні значення швидкості, прискорення та різкості.

Проведено аналіз ефективності даного способу визначення параметрів руху об'єкта по відношенню до класичного способу, знайдено коефіцієнти зменшення похибки визначення параметрів руху об'єкта, які є відношенням СКВ відносних похибок визначення швидкості, прискорення та різкості запропонованого та класичного способів, і з'ясовано, що вони суттєво залежать від кількості використовуваних для обчислень координат (рис. 3):

$$k_V = \frac{\sigma[\varepsilon_{V_{cep}}]}{\sigma[\varepsilon_{V_{cep\Sigma}}]} = \frac{\sqrt{2} K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{(V_{cep})_{\max} \Delta t} \cdot \frac{(V_{cep})_{\max} m \Delta t}{4K \sqrt{m} \sigma[\Delta_{N(t_i)}]} = \sqrt{\frac{m}{8}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{m}{2}}; \quad (7)$$

$$k_a = \frac{\sigma[\varepsilon_{a_{cep}}]}{\sigma[\varepsilon_{a_{cep\Sigma}}]} = \frac{\sqrt{2} K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{(a_{cep})_{\max} (\Delta t)^2} \cdot \frac{\sqrt{m} m (\Delta t)^2 (a_{cep})_{\max}}{108K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]} = \frac{m}{54} \cdot \sqrt{\frac{m}{2}}; \quad (8)$$

$$k_r = \frac{\sigma[\varepsilon_{r_{cep}}]}{\sigma[\varepsilon_{r_{cep\Sigma}}]} = \frac{\sqrt{2} K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]}{(r_{cep})_{\max} (\Delta t)^3} \cdot \frac{\sqrt{m} m^2 (\Delta t)^3 (r_{cep})_{\max}}{2304K \sigma[\Delta_{N(t_i)}]} = \frac{m^2}{1152} \cdot \sqrt{\frac{m}{2}}. \quad (9)$$

За співвідношеннями (7)÷(9) збільшення точності визначення швидкості даним способом відносно класичного відбувається при  $m > 8$ , прискорення – при  $m > 18$ , різкості – при  $m \geq 20$ . Для досягнення ефективного зменшення похибки визначення параметрів руху кількість використовуваних координат має бути: при визначенні швидкості  $m \geq 2k$ ,  $k \geq 5$ , прискорення –  $m \geq 3k$ ,  $k \geq 7$ , різкості –  $m \geq 4k$ ,  $k \geq 5$ , швидкості і прискорення –  $m \geq 6k$ ,  $k \geq 4$ , швидкості і різкості –  $m \geq 4k$ ,  $k \geq 5$ , прискорення і різкості –  $m \geq 12k$ ,  $k \geq 2$ , швидкості, прискорення і різкості –  $m \geq 12k$ ,  $k \geq 2$ .

Проаналізовано основні величини, якими характеризуються робочі умови ви-

мірювання параметрів руху об'єктів, та з'ясовано їх номінальні значення. При визначенні математичної моделі впливу робочих умов (середовища) на коефіцієнт чутливості ЗВ прийнято, що він є функцією коефіцієнтів чутливості перетворювачів, які входять до складу ЗВ і формують результат вимірювання, а тип функції залежить від способу з'єднання перетворювачів в ЗВ, тобто  $k = f(k_1, k_2, \dots, k_m) = f(k_i)$ , де  $k_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) – коефіцієнт чутливості  $i$ -го ВП. Абсолютні відхилення  $\Delta k_i$  від номінального значення  $k_{i0}$  коефіцієнта чутливості  $i$ -го перетворювача обумовлені двома групами факторів: виробничо-технологічними факторами (похибками технології виготовлення перетворювачів  $\Delta k_{i.em}$ ) і відхиленнями від номінальних значень величин, що характеризують робочі умови вимірювання ( $\Delta k_{i.py}$ ), тобто  $\Delta k_i = \Delta k_{i.em} + \Delta k_{i.py}$ .

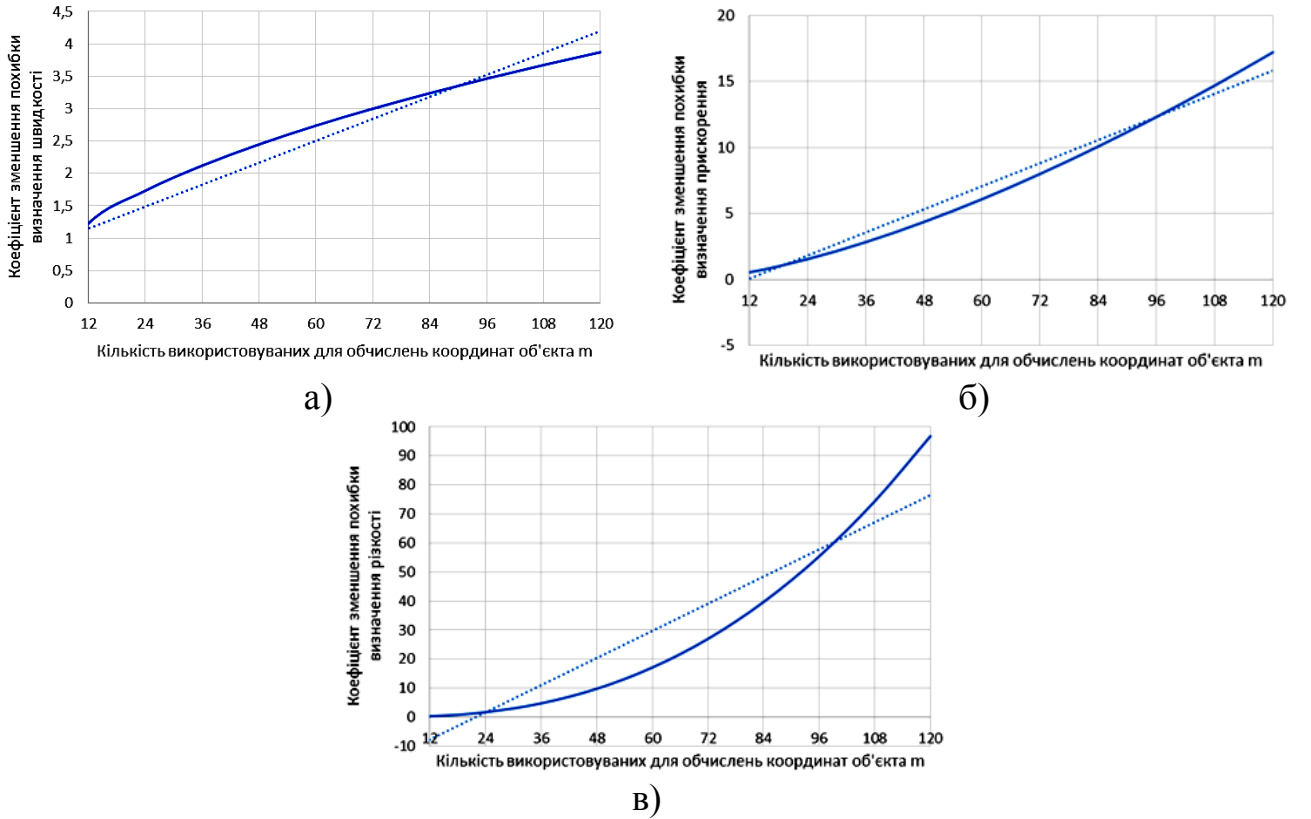


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів зменшення похибок визначення швидкості  $k_v$  (а), прискорення  $k_a$  (б) та різкості  $k_r$  (в) від кількості використовуваних для обчислень координат об'єкту  $m$  на кінцевому інтервалі часу вимірювання  $\Delta t$

Для отримання математичної моделі впливу робочих умов (середовища) на коефіцієнт чутливості ЗВ необхідно розкласти функцію коефіцієнтів чутливості перетворювачів в ряд Тейлора відносно номінальних значень аргументів, а степеневу функцію в дужках – в ряд Маклорена:

$$\begin{aligned} \Delta k &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^j k}{\partial k_i^j} \cdot (\Delta k_i)^j = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(j)} (\Delta k_i)^j = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^j k}{\partial k_i^j} \cdot \left( \Delta k_{i.em} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(j)} (\Delta \xi_l)^j \right)^j = \\ &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^j k}{\partial k_i^j} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{j(j-1)\dots(j-n+1) \Delta k_{i.em}^{j-n} \cdot \left( \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(j)} (\Delta \xi_l)^j \right)^n}{n!} = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^j k}{\partial k_i^j} \Delta k_{i.em}^j + \end{aligned}$$

$$+ \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^j k}{\partial k_i^j} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{j(j-1)\dots(j-n+1) \Delta k_{i,em}^{j-n} \cdot \left( \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(j)} (\Delta \xi_l)^j \right)^n}{n!} = \Delta k_{em} + \Delta k_{py}, \quad (10)$$

де перший доданок  $\Delta k_{em}$  визначає відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ від впливу виробничо-технологічних факторів, другий доданок  $\Delta k_{py}$  – відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ за рахунок відхилень від номінальних значень величин, що впливають на коефіцієнти чутливості перетворювачів ЗВ,  $\gamma_i^{(j)} = \frac{\partial^j f(k_1, k_2, \dots, k_m)}{\partial k_i^j} \Big|_{k_i=k_{i0}}$  та  $\chi_{il}^{(j)} = \frac{\partial^j \psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)}{\partial \xi_l^j} \Big|_{\xi_l=\xi_{l0}}$  – частинні похідні відповідних функцій,  $\xi_{l=1, p}$  – вели-

чини, що впливають на коефіцієнти чутливості перетворювачів.

В загальному вигляді при врахуванні великої кількості членів розкладу функцій  $k_i$  та  $\xi_l$  в ряд Тейлора ( $j \rightarrow \infty$ ) математична модель (10) є складною і не дозволяє визначити окремі складові відхилень коефіцієнтів чутливості ЗВ від номінального значення. При врахуванні тільки лінійного члену розкладу ( $j=1$ ) отримаємо:

$$\Delta k_{j=1} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial f(k_1, k_2, \dots, k_m)}{\partial k_i} \Big|_{k_i=k_{i0}} \times \left( \Delta k_{i,em} + \sum_{l=1}^p \frac{\partial \psi(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)}{\partial \xi_l} \Big|_{\xi_l=\xi_{l0}} \cdot \Delta \xi_l \right) =$$

$$= \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(1)} \cdot \left( \Delta k_{i,em} + \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(1)} \cdot \Delta \xi_l \right) = \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(1)} \Delta k_{i,em} + \sum_{i=1}^m \left( \sum_{l=1}^p \gamma_i^{(1)} \chi_{il}^{(1)} \Delta \xi_l \right) = \Delta k_{em1} + \Delta k_{py1},$$

де  $\Delta k_{em1} = \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(1)} \Delta k_{i,em}$  та  $\Delta k_{py1} = \sum_{i=1}^m \alpha_i^{(1)} \Delta \xi_l = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{l=1}^p \gamma_i^{(1)} \chi_{il}^{(1)} \Delta \xi_l \right)$  – відповідні відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ при врахуванні тільки лінійного члену розкладу;  $\alpha_i^{(1)} = \sum_{l=1}^p \gamma_i^{(1)} \chi_{il}^{(1)}$  – коефіцієнти впливу відхилень  $\Delta \xi_l$  на відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ при врахуванні тільки лінійного члену розкладу.

При  $j=2$  (при врахуванні ще квадратичного члену розкладу) отримаємо:

$$\Delta k_{j=2} = \sum_{j=1}^2 \frac{1}{j!} \sum_{i=1}^m \frac{\partial^j k}{\partial k_i^j} \cdot \left( \Delta k_{i,em} + \sum_{j=1}^2 \frac{1}{j!} \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(j)} (\Delta \xi_l)^j \right)^2 = \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(1)} \Delta k_{i,em} +$$

$$+ \sum_{i=1}^m \left( \sum_{l=1}^p \gamma_i^{(1)} \chi_{il}^{(1)} \Delta \xi_l \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(2)} \Delta k_{i,em}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \Delta k_{i,em} \left( \sum_{l=1}^p \gamma_i^{(2)} \chi_{il}^{(2)} \Delta \xi_l^2 \right) +$$

$$+ \frac{1}{8} \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(2)} \cdot \left( \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(2)} \Delta \xi_l^2 \right)^2 = \Delta k_{em1} + \Delta k_{py1} + \Delta k_{em12} + \Delta k_{py12.1} + \Delta k_{py12.2} = \Delta k_{em2} + \Delta k_{py2},$$

де  $\Delta k_{em12} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(2)} \Delta k_{i,em}^2$  – відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ за рахунок впливу

виробничо-технологічних факторів при врахуванні тільки квадратичного члена розкладу;

$$\Delta k_{py12.1} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \Delta k_{i.em} \left( \sum_{l=1}^p \gamma_i^{(2)} \chi_{il}^{(2)} \Delta \xi_l^2 \right) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \Delta k_{i.em} \left( \sum_{l=1}^p \alpha_l^{(2)} \Delta \xi_l^2 \right) \quad \text{та}$$

$\Delta k_{py12.2} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(2)} \cdot \left( \sum_{l=1}^p \chi_{il}^{(2)} \Delta \xi_l^2 \right)^2$  – відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ за рахунок

відхилень від номінальних значень величин, що впливають на коефіцієнти чутливості перетворювачів ЗВ при врахуванні тільки квадратичного члена розкладу;

$\alpha_l^{(2)} = \sum_{i=1}^m \gamma_i^{(2)} \chi_{il}^{(2)}$  – коефіцієнти, що визначають вплив відхилень  $\Delta \xi_l$  на відхилення

коефіцієнта чутливості ЗВ при врахуванні тільки квадратичного члена розкладу;

$\Delta k_{em2} = \Delta k_{em1} + \Delta k_{em12}$  та  $\Delta k_{py2} = \Delta k_{py1} + \Delta k_{py12.1} + \Delta k_{py12.2}$  – відхилення коефіцієнта чутливості ЗВ при врахуванні двох перших членів розкладу.

Вплив робочих умов на об'єкт вимірювання необхідно враховувати тому, що він приводить до змін вимірюваної величини, яка характеризує об'єкт вимірювання, а впливовими можуть бути всі чотири групи величин, якими характеризуються робочі умови вимірювання. В підсумку вплив робочих умов на об'єкт вимірювання зводиться до адитивного збурення, прикладеного до входу ЗВ.

Проведена оцінка точності навігаційно-часових визначень в СРНС і з'ясовано, що точність визначення координат МР при використанні різних видів дальномірних і радіальних методів практично однакова. Іоносферна і тропосферна похибки мають як систематичну, так і випадкову складові (математичне сподівання і дисперсію). Величина іоносферної похибки визначається електронною концентрацією в іоносфері, не залежить від розташування навігаційних супутників (НС) та впливає на точність визначення висоти і відхилення бортового годинника від системного часу. Затримка сигналу в тропосфері істотно залежить від кута місця розташування НС.

Для зменшення похибок бортової апаратури МР використовують апаратні методи підвищення стабільності шкали і алгоритмічні методи, основані на відомих математичних моделях поведінки бортових еталонів, що дозволяє прогнозувати відхилення. Основним джерелом шумових і динамічних похибок приймального пристрою є схеми стеження за затримкою оригінальної та носійного сигналу і опорний генератор, основним впливовим чинником якого є короткочасна нестабільність частоти.

Складено бюджет похибок визначення псевдодальності, псевдошвидкості та псевдоприскорення дальномірними методами і з'ясовано потенційні значення їх сумарних похибок (відповідно 6.3 м, 0.09 м/с та 0.0238 м/с<sup>2</sup>).

Вперше отримано математичну модель залежності швидкості ультразвуку в повітрі від групи кліматичних факторів (температури  $t^o$ , відносної вологості повітря  $W$  і атмосферного тиску  $P$ ), швидкості вітру  $V_B$  та кута  $\alpha$  між напрямком вітру в точці спостереження і напрямком надходження ультразвуку, згідно з якою оцінки визначення швидкості ультразвуку в різних діапазонах температур мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{V}_3(t^o, W, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-10 \div 30)^o C} &= 331.26 + 0.592 t^o + \frac{0.1628(t^o + 273)W}{P} + V_B \cos \alpha; \\ \hat{V}_3(t^o, W, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-30 \div 80)^o C} &= 330.95 + 0.584 t^o + \frac{0.1606(t^o + 273)W}{P} + V_B \cos \alpha. \end{aligned} \quad (11)$$



Поверхні, що описують залежності швидкості ультразвуку в повітрі від температури і атмосферного тиску при  $W=65\%$ , представлені на рис. 4.

Тому що визначення швидкості ультразвуку для розв'язання навігаційних задач мобільної робототехніки проводиться в різних кліматичних умовах, досліджено степінь впливу групи кліматичних факторів на вихідний сигнал ультразвукового випромінювача для двох випадків – при оцінці швидкості ультразвуку на відкритому просторі і в приміщенні. Вибір кліматичних факторів обумовлений можливістю їх вимірювання за допомогою мікроелектронних компонентів і використання для підвищення точності приладової системи МР. За результатами  $n=256$  вимірювань, виконаних за три місяці, проведений кореляційний аналіз і розраховано частинні коефіцієнти кореляції, які визначають степінь впливу на ультразвуковий сигнал кожного кліматичного фактора окремо. Оцінка значущості проводилась за співвідношенням розрахункового значення критерія Стюдента, обчисленого за формулою

$t_i = \frac{r_i \sqrt{n-1}}{1-r_i^2}$ , і його табличного значення для  $n \geq 200$  та рівня значущості  $\alpha = 0.01$ .

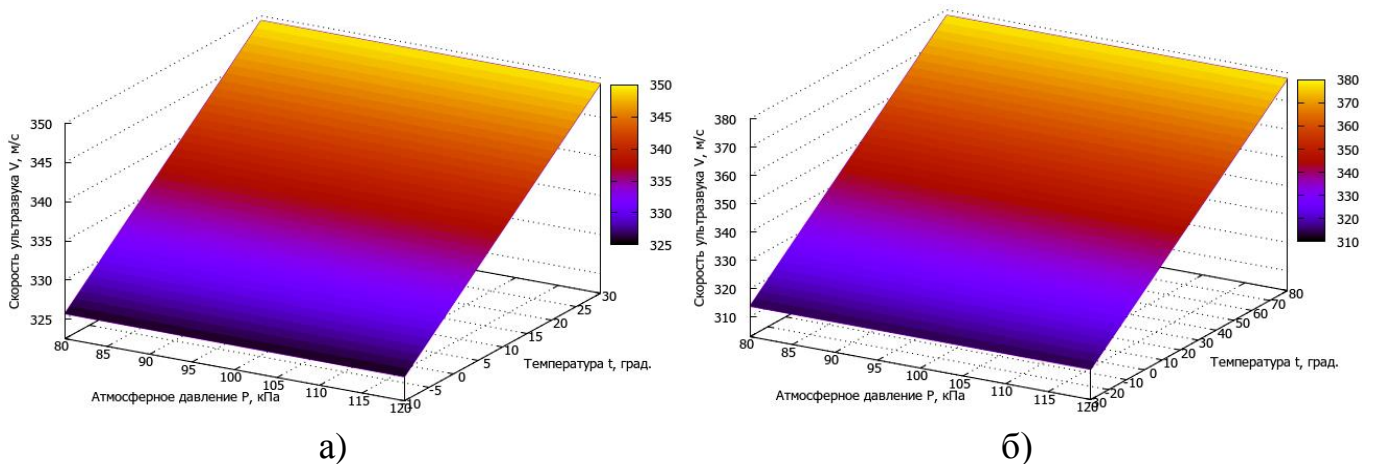


Рис. 4. Залежності швидкості ультразвуку в повітрі від температури в діапазонах  $(-10 \dots +30)^\circ\text{C}$  (а) та  $(-30 \dots +80)^\circ\text{C}$  (б), зміні атмосферного тиску від 80 кПа до 120 кПа та при номінальній відносній вологості повітря 65%

Результати досліджень показують тісний зв'язок між кліматичними факторами і вихідним сигналом п'єзовипромінювача. Температура повітря максимально впливає на вихідний сигнал в обох випадках, однак на відкритому просторі вплив більш значущий. Атмосферний тиск здійснює на вихідний сигнал слабкий зворотний вплив на відкритому просторі, а в приміщенні його вплив є статистично незначущим. Вплив відносної вологості повітря в обох випадках є статистично незначущим.

За результатами досліджень при визначенні швидкості ультразвуку на відкритому просторі можна вважати сталою відносну вологість повітря, а в приміщенні – ще й атмосферний тиск, тобто (11) в різних діапазонах температур запишуться так:

- оцінка швидкості ультразвуку на відкритому просторі:

$$\hat{V}_3(t^\circ, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-10 \div 30)^\circ\text{C}} = 331.26 + 0.592 t^\circ \cdot \left(1 + \frac{0.1788}{P}\right) + \frac{28.889}{P} + V_B \cos \alpha;$$

$$\hat{V}_3(t^\circ, P, V_B, \alpha) \Big|_{(-30 \div 80)^\circ\text{C}} = 330.95 + 0.584 t^\circ \cdot \left(1 + \frac{0.1788}{P}\right) + \frac{28.498}{P} + V_B \cos \alpha;$$

- оцінка швидкості ультразвуку в приміщенні:

$$\hat{V}_3(t^o) \Big|_{(-10 \div 30)^{\circ}C} = 331.549 + 0.5931t^o; \quad \hat{V}_3(t^o) \Big|_{(-30 \div 80)^{\circ}C} = 331.235 + 0.5851t^o.$$

Таким чином, необхідно враховувати, що на вихідний сигнал п'єзовипромінювача суттєво впливає зміна температури повітря та менш значуще атмосферний тиск і відносна вологість повітря, тому до складу такої приладової системи мають входити сенсори кліматичних параметрів з подальшим використанням їх показів для підвищення точності навігаційно-часових визначень (НЧВ). Використання ультразвукових далекомірів без додаткових навігаційних пристроїв (одометри, ІНС, *GPS*) виправдане тільки в тому випадку, якщо чітко визначені умови роботи системи (відомі відбивальні властивості об'єктів, межі вимірювання дальності до них та кліматичні параметри в зоні вимірювання).

В сучасних електронних системах МР використовуються спеціалізовані та оптимізовані для конкретного використання сенсори, які в реальному часі визначають поточний статус або динаміку МР і його систем (підсистем). Відповідно до розвитку сучасної сенсорної технології інтелектуальні сенсори в свою чергу є підсистемами по відношенню до систем, для яких вони виконують свої вимірювання. Деякі з цих інтелектуальних сенсорів є складними мультисенсорними блоками, що об'єднують декілька сенсорів з декількома вхідними і вихідними інтерфейсами. Це означає, що при введенні нових функцій і технологій на рівні всього МР сенсори також можуть вводитися збитково, а на перший план виходить оптимізація сенсорної архітектури. Однак сенсори, приводи і електроніка приводять до більш високої системної ціни МР та додаткового навантаження на джерела енергії (живлення), механічні структури та обчислювальні блоки (мікроконтролери (МК) і програмне забезпечення). Для розв'язання цієї проблеми до використання в МРТК пропонується мережева архітектура, в якій сигнали надходять від сенсорних вузлів до різних доменів у вже обробленому (підготовленому вбудованою схемою сенсора) вигляді, тому що на даний час більшість сучасних сенсорів вже є МК, доповненими сенсорними функціями. По мірі підвищення вимог до електронних систем і відповідного розвитку сенсорних технологій для обробки (корекції) основних показань системи керування задіюються додаткові мультиосьові сенсори і мультисенсорні модулі з оптимізованою сенсорною архітектурою для комплексної обробки сенсорних сигналів.

З'ясовано і проаналізовано ефективність використання в мобільній робототехніці різних типів сенсорних технологій (переважно радарних та інтегрованих радарно-камерних) при різних погодних умовах з функцією інфрачервоного детектування для нічного моніторингу людей та тварин.

Коротко розглянуто найсучасніші технології, які провідні світові виробники використовують при розробці МРТК малої помітності, а також перспективні заходи, спрямовані на підвищення якості компонентів і конструктивної досконалості таких об'єктів (трансгенні біополімери при розробці ультралегких, надміцних і еластичних матеріалів з покращеними стелс-характеристиками для корпусів МРТК; вуглецеві нанотрубки для використання в електронних системах МРТК і композитах для послаблення електромагнітного випромінювання; МЕМС технології; водневі двигуни, які дозволяють істотно зменшити рівень шуму; інтелектуальні матеріали, що змінюють свою форму або виконують деяку задану функцію під впливом зовнішніх дій;

інтелектуальні композити, що складаються з підсистем зчитування сигналу (дії), його обробки, формування відгуку, а також механізмів зворотного зв'язку, самодіагностування і самовідновлення; самовідновні матеріали: полімери, кераміка, метали і матеріали структури на основі графену; магнітні наночастинки, які істотно розширюють обчислювальні можливості роботизованих і безпілотних систем).

Проаналізовано методи виявлення об'єктів стелс-технологій і показано, що тільки за рахунок системного підходу можна технічними засобами радіолокаційної станції (РЛС) компенсувати зменшення ефективної поверхні розсіювання таких об'єктів. Тому що наслідком малопомітності об'єкту є зменшення відношення сигнал/шум, то в приймальному пристрої РЛС даний параметр має бути максимально збільшений. Показано, що основним методом збільшення дальності до радіогоризонту є використання РЛС повітряного базування. Для організації колективної роботи декількох РЛС при виявленні малопомітних об'єктів перспективними є методи виявлення об'єктів за слідами взаємодії їх з навколишнім (зокрема, водним) середовищем. Проблема виявлення об'єктів стелс-технологій може бути розв'язана тільки при системному підході до реалізації всіх технічних засобів РЛС та розробці методів і алгоритмів виявлення об'єктів, що працюють при малому відношенні сигнал/шум.

**У третьому розділі** проведено аналіз та математичне моделювання похибок МЕМС акселерометрів приладових систем мобільних роботів. Представлені математичні моделі МЕМС акселерометра MMA7331LT в різних формах:

- механічний у формі передавальної функції за каналом “прискорення  $a$  – змі-

щення інерційної маси  $X''$ ” 
$$W_c(p) = \frac{X'(p)}{a(p)} = \frac{m}{m \cdot p^2 + c \cdot p + k},$$
 де  $m$  – ефективна інер-

ційна маса, яка є мірою розміру рухомої частини і залежить від типу кріплення на кристалі;  $k$  – коефіцієнт жорсткості пружного елементу, величина якого залежить від вибраного матеріалу і конструкції резонатора, а в резонансному режимі роботи й від конкретної моди коливань;  $c$  – коефіцієнт опору демпфуючого елементу, який враховує внутрішні та зовнішні втрати енергії в системі;

- електричний у формі передавальної функції за каналом “прискорення  $a$  –

вихідна напруга  $U''$ ” 
$$W_c(p) = \frac{U(p)}{a(p)} = \frac{G}{p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2} = \frac{K}{\alpha \cdot p^2 + \beta \cdot p + 1},$$
 де

$\omega_0 = \sqrt{k/m}$  – частота власних коливань акселерометра;  $\xi = c/(2\sqrt{k \cdot m})$  – коефіцієнт

затухання;  $K = \frac{G}{\omega_0^2}$  – статичний коефіцієнт передачі акселерометра (коефіцієнт чут-

ливості);  $G$  – масштабний коефіцієнт акселерометра;  $\alpha = \frac{1}{\omega_0^2}$  і  $\beta = \frac{2\xi}{\omega_0}$  – коефіцієнти,

що визначають інерційність акселерометра;

- схемотехнічний у формі еквівалентної електричної схеми послідовного резонансного контуру з еквівалентними ємністю  $C_{екв}$ , індуктивністю  $L_{екв}$  і опором  $R_{екв}$ , в якому вихідна напруга знімається з конденсатора, при цьому  $\alpha = L_{екв} C_{екв}$  та  $\beta = R_{екв} C_{екв}$ ; таке представлення зручно використовувати в середовищах *Electronics Workbench* або *NI Multisim* для моделювання частотних і часових характеристик.

Проведені оцінка параметрів електричної моделі МЕМС акселерометра ММА7331LT та порівняння експериментальної і змодельованої нормованих АЧХ, яке доводить адекватність запропонованих моделей. Показано, що використання “індивідуальних” моделей дозволяє підвищити точність визначення величини прискорення з 14% для паспортних даних до 3.5% для “індивідуальних” моделей.

## Деталізовано узагальнене рівняння похибок акселерометрів БІНС

$$\Delta a = 0.01\delta K^A n - \left[M^A \times\right] n + \left(E + 0.01\delta K^A\right)a^e + \delta a, \quad (12)$$

де  $\delta K^A = (K^A)^{-1} \Delta K^A \cdot 100\% = \text{diag} \left\| \delta k_X^A \quad \delta k_Y^A \quad \delta k_Z^A \right\|$  – діагональна матриця відносних похибок коефіцієнтів перетворення акселерометрів, [%];  $n = \left\| n_X \quad n_Y \quad n_Z \right\|^T$  – матриця проєкцій вектора уявного прискорення вершини зв’язаного тригранника на свої ребра;  $[M^A \times]$  – кососиметрична матриця кутів відхилення  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\chi$  вимірювальних осей акселерометрів  $OX^iY^iZ^i$  від зв’язаної з МР системи координат  $OXYZ$ ;  $E$  – одинична матриця;  $a^e$  – вектор переносного прискорення, поява якого викликана зміною кутової швидкості зв’язаної системи координат  $\dot{\omega}$  і відцентровим прискоренням (в англomовній літературі *size effect* – вплив розмірів);  $\delta a = \delta a_S + \delta a_R$  – нестабільності нулів акселерометрів, яку представлено сумою систематичної  $\delta a_S$  (*Systematic Error*) і випадкової  $\delta a_R$  (*Random Error*) складових.

Перший доданок в (12) характеризує вплив похибок коефіцієнтів перетворення, другий – неточність установки вимірювальних осей акселерометрів, третій – вплив переносних прискорень на похибки акселерометрів (*size effect*), четвертий – зміщення нулів акселерометрів. Блок-схема формування похибок у вихідному сигналі акселерометрів наведена на рис. 5.

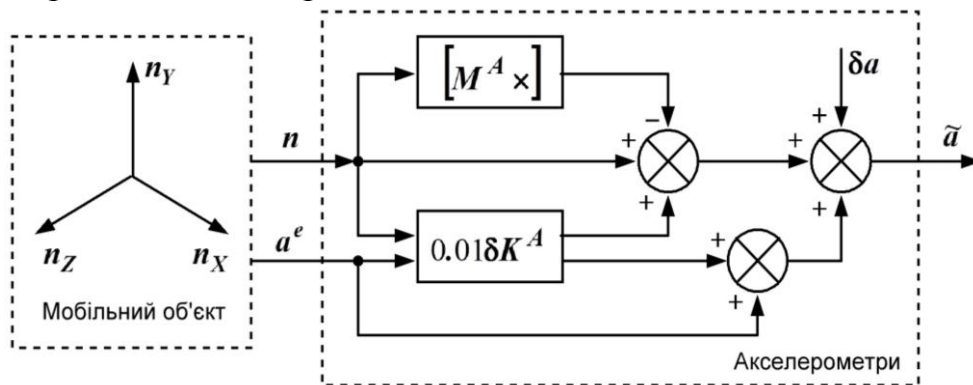


Рис. 5. Блок-схема формування похибок у вихідному сигналі акселерометрів

Складові випадкової похибки акселерометрів, які є сенсорами інерціального типу, визначаються наявністю шумів і шумовими процесами різного роду:

$$\delta a_R = \delta a_{WN} + \delta a_{BI} + \delta a_{ARW} + \delta a_{MN}, \quad (13)$$

де  $\delta a_{WN}$  – складова випадкової похибки, обумовлена наявністю білого шуму (*White Noise, (WN)*);  $\delta a_{BI}$  – нестабільність нуля (*Bias Instability, (BI)*);  $\delta a_{ARW}$  – випадкове блукання прискорення (*Acceleration Random Walk, ARW*);  $\delta a_{MN}$  – складова випадкової похибки, обумовлена наявністю експоненційно-корельованого (марковського) шуму (*Markov Noise, MN*).

До флуктуацій прискорення приводять різні збурення, зокрема, термомеханіч-

ний шум, які діють на вихідний сигнал МЕМС акселерометра, при цьому СКВ накопичення похибки визначення швидкості при наявності у вихідному сигналі білого шуму зростає пропорційно кореню квадратному з часу  $\sigma_v(t) = \sigma_{WN} \sqrt{T_0 t} = v_{VRW} \sqrt{t}$ , де  $v_{VRW} = \sigma_{WN} \sqrt{T_0}$  – випадкове блукання швидкості (*Velocity Random Walk, (VRW)*).

Нестабільність нуля (*Bias Instability, BI*) викликана шумами в електронних компонентах зняття і обробки інформації акселерометрів та пов'язана з флікер-шумом (*Flicker noise*). При дробовому інтегруванні спектру білого шуму (в даному випадку інтегралу половинного порядку від білого шуму  $w(t)$ ), тобто при проходженні білого шуму через фільтр з передавальною функцією  $K(p) = p^{-1/2}$ , флуктуації на його виході будуть мати  $1/f$  – спектр (рис. 6, а), тобто моделювати нестабільність нуля. Коефіцієнт нестабільності нуля акселерометра визначається за ділянкою кривої відхилення Алана з нахилом 0 (за мінімальним значенням кривої):  $B = \frac{\sigma(\tau = nT_0)}{0.664}$ .

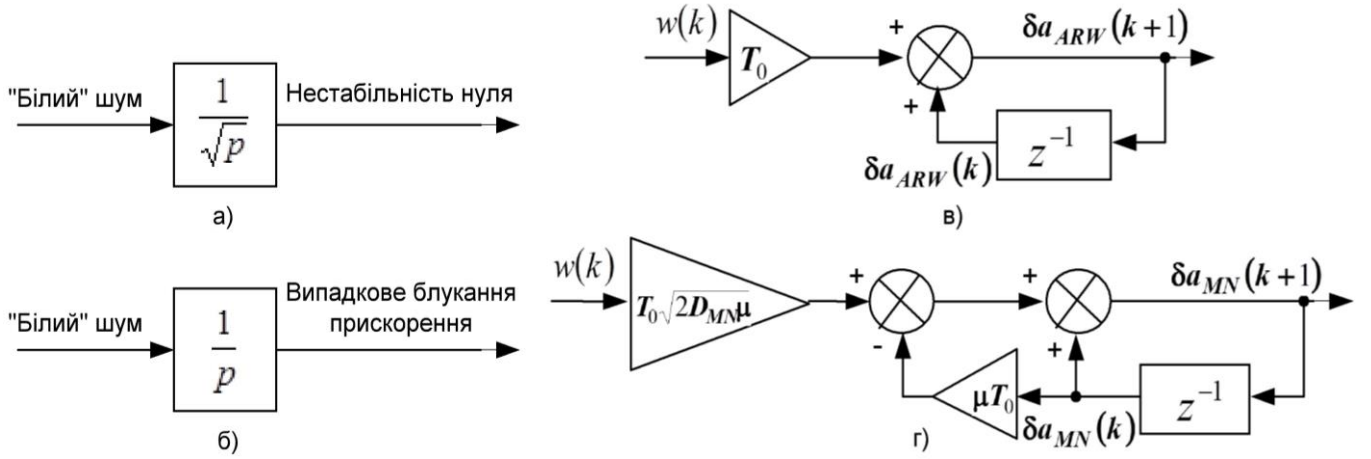


Рис. 6. Моделі формування нестабільності нуля (а), випадкового блукання прискорення (б), випадкового блукання з білого шуму (в) та експоненційно-корельованого шуму з білої послідовності (г)

Випадкове блукання прискорення  $\delta a_{ARW}$  описується вінерівським випадковим процесом (випадковим блуканням) виду  $\frac{d}{dt} \delta a_{ARW} = w(t)$ . Тому що  $\delta a_{ARW} = \int_0^t w(\tau) d\tau$ , то випадкове блукання прискорення утворюється як результат пропускання білого шуму через інтегратор з передавальною функцією  $K(p) = p^{-1}$  (рис. 6, б).

Якщо білий шум  $w(t)$  має спектральну густину  $S_0$ , то спектральна густина випадкового блукання прискорення  $S_{ARW} = \left| \frac{1}{i\omega} \right|^2 \cdot S_0 = \frac{S_0}{\omega^2}$ . Тому що похідну можна представити як  $\frac{d}{dt} \delta a_{ARW} \approx \frac{\Delta(\delta a_{ARW})}{\Delta t} \approx \frac{\delta a_{ARW}(k+1) - \delta a_{ARW}(k)}{T_0} = w(k)$ , то для дискретного часу  $\delta a_{ARW}(k+1) = \delta a_{ARW}(k) + T_0 w(k)$ . Блок-схема формування випадкового блукання прискорення для дискретного часу наведена на рис. 6, в. СКВ випадкового блукання прискорення накопичується з часом як  $\sigma_{ARW}(t) = \sigma_{WN}^* \sqrt{T_0 t} = a_{ARW} \sqrt{t}$ ,



тобто аналогічно  $VRW$ , де  $\sigma_{wN}^*$  – СКВ породжуючого білого шуму  $w(t)$ .

Експоненційно-корельований (марковський) шум  $\delta a_{MN}$  описується диференціальним рівнянням виду  $\frac{d}{dt}\delta a_{MN}(t) + \mu \cdot \delta a_{MN}(t) = \sqrt{2D_{MN}\mu} w(t)$ , яке для дискретного часу представляється так:  $\delta a_{MN}(k+1) = \delta a_{MN}(k)[1 - \mu T_0] + T_0 \sqrt{2D_{MN}\mu} w(k)$ . Для адекватного переходу від неперервної моделі до дискретної необхідно задавати білу послідовність  $w(t)$  з СКВ  $1/\sqrt{T_0}$ . На рис. 6, г наведено формування експоненційно-корельованого шуму з білої послідовності.

Проведено дослідження MEMС акселерометрів *Gemini CAS 211/291* для кожної осі з частотою дискретизації 100 Гц і наведені криві відхилення Алана (рис. 7).

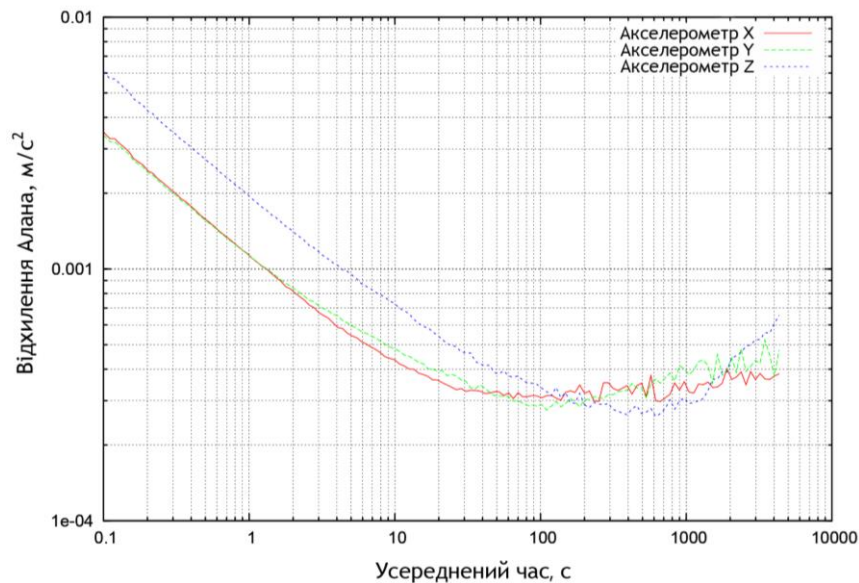


Рис. 7. Криві відхилення Алана MEMС акселерометрів *Gemini CAS211/291*

При малих значеннях  $\tau$  спостерігається нахил  $-0.5$  кривих відхилення Алана, що відповідає наявності білого шуму у вихідних сигналах акселерометрів. При  $\tau = 1$  с визначається випадкове блукання швидкості  $v_{VRW}$ . В області  $\tau = (40 \div 400)$  с криві відхилення Алана мають мінімум на ділянці з нульовим нахилом, що відповідає нестабільності нуля. При подальшому збільшенні часу усереднення  $\tau$  криві відхилення Алана мають злам і набувають позитивного нахилу  $+0.5$ , що характеризує наявність випадкового блукання прискорення у вихідних сигналах. Локального максимуму між асимптотами з нахилами  $+0.5$  і  $-0.5$  на кривих не спостерігається, що говорить про відсутність марковського шуму у вихідних сигналах акселерометрів.

Аналіз результатів вимірювання шумових параметрів досліджуваних зразків акселерометрів, наведених в табл. 1, показує, що вісь Z акселерометра має приблизно удвічі більше випадкове блукання швидкості, ніж осі X і Y, а випадкове блукання прискорення – приблизно на 50% більше, тобто вісь Z є більш шумною, ніж осі X і Y.

Отримано співвідношення, які дозволяють оцінити похибки одноканальної БІНС на короткому часовому інтервалі за значеннями інструментальних похибок інерціальних сенсорів без моделювання алгоритму інерціальної системи. Проведено числові оцінки похибок такої БІНС, реалізованої на MEMС сенсорах низького класу точності (проаналізовано вплив систематичних похибок, вплив похибок коефіцієн-

тів перетворення, вплив шуму, вплив нестабільності нуля інерціальних сенсорів та вплив неточного вводу початкових умов), і зроблено висновок, що МЕМС гіроскопи з часом накопичують значно більші похибки визначення параметрів руху і орієнтації порівняно з МЕМС акселерометрами такого самого класу точності. В першому наближенні можна вважати, що похибки визначення кута тангажу, викликані похибками акселерометрів, не впливають на похибки БІНС визначення параметрів орієнтації через наявність в знаменнику формул для їх обчислення радіусу Землі.

Таблиця 1

## Результати вимірювання шумових параметрів акселерометрів

	Нестабільність нуля	Випадкове блукання швидкості	Випадкове блукання прискорення
Вісь X	$4.52 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2 =$ $= 1.63 \text{ м/год}^2 \text{ (за 670 с)}$	$0.0011 \text{ м/с}^{1.5} =$ $= 112 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$	$6.7 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^{1.5} =$ $= 68 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$
Вісь Y	$4.22 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2 =$ $= 1.52 \text{ м/год}^2 \text{ (за 110 с)}$	$0.0011 \text{ м/с}^{1.5} =$ $= 112 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$	$7.1 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^{1.5} =$ $= 72 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$
Вісь Z	$3.92 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2 =$ $= 1.41 \text{ м/год}^2 \text{ (за 620 с)}$	$0.0020 \text{ м/с}^{1.5} =$ $= 203.9 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$	$0.0011 \text{ м/с}^{1.5} =$ $= 112 \text{ мкг}/\sqrt{\text{Гц}}$

Встановлено зв'язок варіації Алана з дисперсією похибки оцінювання постійної складової вихідного сигналу інерціального сенсора, отриманої при усередненні. Показано, що за визначених умов варіація Алана збігається з дисперсією похибки оцінювання постійної складової. Це дозволяє з її допомогою оцінювати мінімальне значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення

$$\sigma_{A.\min}^2(\tau_{opt}) \approx \frac{2KN}{\sqrt{3}} + B^2 \frac{2 \ln 2}{\pi} \text{ і визначати оптимальний час усереднення } \tau_{opt} \cong \frac{\sqrt{3}N}{K},$$

що є важливим при калібруванні інерціальних сенсорів ( $N^2$  та  $K^2$  – інтенсивності білого шуму та породжуючого шуму вінерівського процесу). За методикою, основою на використанні варіації Алана, розроблено і протестовано спеціалізоване програмне забезпечення, яке дозволяє обчислювати варіацію Алана за результатами обробки високочастотної інформації інерціальних сенсорів (акселерометрів і гіроскопів) при тривалих запусках з подальшою поліноміальною апроксимацією.

В табл. 2 наведена чисельна оцінка коефіцієнтів  $K$ ,  $B$ ,  $N$  без врахування знаку, отримана за кривими відхилення Алана (рис. 7) за результатами обробки трьох 3-годинних запусків. Для першого з запусків апроксимуючі вирази для варіацій Алана для кожної осі МЕМС акселерометрів Gemini CAS211/291 будуть мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_{A.X}^2(\tau) &\approx p_{A.X}^2(\tau) = (0.0012461\tau + 8.3072 + 114.9283/\tau) \cdot 10^{-8}; \\ \sigma_{A.Y}^2(\tau) &\approx p_{A.Y}^2(\tau) = (0.0020898\tau + 9.1023 + 111.4782/\tau) \cdot 10^{-8}; \\ \sigma_{A.Z}^2(\tau) &\approx p_{A.Z}^2(\tau) = (0.0022251\tau + 8.0072 + 336.3117/\tau) \cdot 10^{-8}. \end{aligned} \quad (14)$$

За обчисленими в табл. 2 математичними сподіваннями (МС) коефіцієнтів поліному  $p_A^2(\tau)$  для трьох запусків визначено оптимальний за критерієм мінімуму дисперсії час усереднення та відповідні мінімальні СКВ оцінки для кожної осі:

$$\tau_{opt.X} = 279.2 \text{ c}; \quad \sigma_{A.min.X} = 3.1043 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2; \quad \tau_{opt.Y} = 229.4 \text{ c};$$

$$\sigma_{A.min.Y} = 3.1869 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2; \quad \tau_{opt.Z} = 368.7 \text{ c}; \quad \sigma_{A.min.Z} = 3.3724 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2.$$

Таблиця 2

Апроксимація варіації Алана поліномом для акселерометрів Gemini CAS211/291

Номер запуску	Коефіцієнти поліному $p_A^2(\tau)$								
	вісь X			вісь Y			вісь Z		
	$ K  \cdot 10^{-6},$ м/с <sup>2</sup> /√с	$ B  \cdot 10^{-4},$ м/с <sup>2</sup>	$ N  \cdot 10^{-4},$ м/с/√с	$ K  \cdot 10^{-6},$ м/с <sup>2</sup> /√с	$ B  \cdot 10^{-4},$ м/с <sup>2</sup>	$ N  \cdot 10^{-4},$ м/с/√с	$ K  \cdot 10^{-6},$ м/с <sup>2</sup> /√с	$ B  \cdot 10^{-4},$ м/с <sup>2</sup>	$ N  \cdot 10^{-4},$ м/с/√с
1	6.1142	4.3377	10.7204	7.9181	4.5401	10.5583	8.1712	4.2586	18.3385
2	6.9514	4.8673	9.8734	8.6153	4.3827	10.3597	7.4924	5.0473	15.8756
3	6.5474	4.2198	11.0257	7.7456	4.8908	11.2375	8.8347	4.7804	17.9375
МС	<b>6.5381</b>	<b>4.4749</b>	<b>10.5398</b>	<b>8.0931</b>	<b>4.6045</b>	<b>10.7185</b>	<b>8.1661</b>	<b>4.6954</b>	<b>17.3839</b>
$[\text{МС}_{\min} \div \text{МС}_{\max}]$	$[6.0019 \div 7.0783]$	$[4.1307 \div 4.9792]$	$[9.6208 \div 11.3346]$	$[7.5211 \div 8.9317]$	$[4.2208 \div 5.1746]$	$[9.9243 \div 11.5687]$	$[7.0396 \div 9.2894]$	$[4.0683 \div 5.3748]$	$[15.1108 \div 19.1347]$
СКВ $\sigma$	<b>0.4204</b>	<b>0.3463</b>	<b>0.5994</b>	<b>0.4624</b>	<b>0.2612</b>	<b>0.4622</b>	<b>0.6739</b>	<b>0.4028</b>	<b>1.3269</b>

Всі розраховані оптимальні значення часу усереднення потрапляють в діапазон (40÷400) с, визначений для даних акселерометрів як діапазон мінімальних значень кривих відхилення Алана на ділянці з нульовим нахилом (рис. 7). В подальшому при дослідженні точнісних характеристик приладових систем на підприємствах галузі приладобудування пропонується разом з класичними методами статистичної обробки використовувати метод варіації Алана як ефективний спосіб ідентифікації структури шумів в каналі ЗВ.

Показано, що за відомими моделями похибок інерціальних сенсорів можна оцінити загальну похибку БІНС або розв'язати зворотну задачу – висунути вимоги до інерціальних сенсорів для забезпечення заданої точності БІНС.

Деталізовано модель похибок БІНС при визначенні швидкості і координат МР, на основі якої розроблено узагальнену блок-схему формування похибок БІНС при визначенні параметрів руху об'єкта (наведена для географічної системи координат, однак може бути трансформована до будь-якої іншої) (рис. 8):

$$\Delta n_{eg}^g = \Delta \dot{v}_{eg}^g = n_{ig}^g \times \Psi + C_g^{\tilde{g}} \Delta n_{ig}^g; \quad \Delta \dot{r}_{eg}^g = \Delta v_{eg}^g,$$

де  $\Delta \dot{r}_{eg}^g$  – вектор похибок БІНС при обчисленні координат;  $\Delta n_{ig}^g$  – похибки акселерометрів, перераховані до географічної системи координат;  $C_g^{\tilde{g}} = C_b^{\tilde{g}} C_g^b$  – розрахункова матриця, яка використовується в алгоритмах БІНС;  $n_{ig}^g$  – вектор уявного прискорення в географічній системі координат;  $\Psi$  – вектор кінцевого повороту.

Наявність в блок-схемі вектора кутової швидкості  $\omega_{ig}^g$  і матриці  $C_b^g$  (в рівнянні швидкості зміни вектора кінцевого повороту  $\dot{\Psi} = \Psi \times \omega_{ig}^g + \Delta \omega_{ig}^g - C_b^g \Delta \omega_{ib}^b$ ), а та-



кож вектора уявного прискорення  $n_{ig}^g$  говорить про те, що величина похибок БІНС залежить від динаміки руху МР.

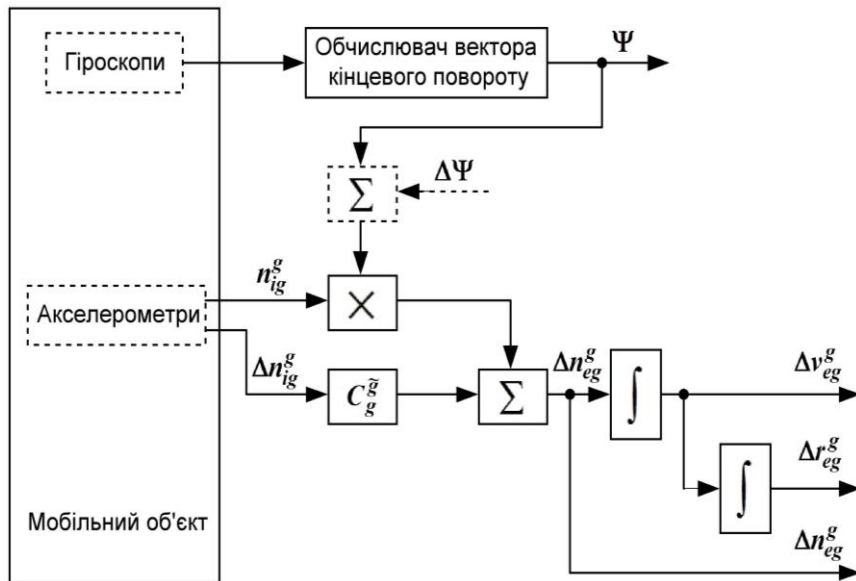


Рис. 8. Блок-схема формування похибок БІНС при визначенні параметрів руху МР

У четвертому розділі розроблено пристрої обробки сигналів МЕМС сенсорів приладових систем мобільних роботів та алгоритми їх роботи.

Запропоновано використовувати генераторний нульовий метод для побудови пристроїв обробки сигналів ємнісних МЕМС сенсорів приладових систем МР, згідно з яким перетворення ємності в частоту реалізується при виділенні різницевої частоти сигналів двох генераторів, до складу яких входять ємності МЕМС сенсорів (акселерометрів або гіроскопів). Розроблено схеми перетворювачів ємності в частоту, які реалізовані на основі генераторного нульового методу. Різницевий принцип формування вихідного сигналу забезпечує високу чутливість пристроїв без використання зарядових підсилювачів, що підвищує стійкість схеми до впливу шумів. Використання для формування вихідних імпульсів двох ідентичних генераторів забезпечує часткову компенсацію температурних змін вихідної частоти, що розширює діапазон робочих температур пристроїв обробки. Також запропонована схема перетворювача частоти в напругу, який має високу лінійність в діапазоні частот до 1 МГц. Проведено моделювання розроблених схем пристроїв обробки сигналів, яке підтвердило можливість використання різницевого принципу формування вихідного сигналу для обробки сигналів МЕМС сенсорів приладових систем МР.

Вперше запропоновано визначати параметри ємнісних МЕМС сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів, за результатами вимірювань кута фазового зсуву між двома напругами на виході ВП та відношення амплітуд цих напруг (схеми ВП захищені патентами України на винахід №57135 і №57836).

Згідно розробленого амплітудно-фазового методу визначити параметри еквівалентної схеми ємнісного МЕМС сенсора за еквівалентною схемою паралельного контуру можна, вимірявши фазові зсуви  $\varphi_{1,1}$  і  $\varphi_{1,2}$  між комплексними напругами  $\dot{U}_1$  і  $\dot{U}_2$  на частотах  $\omega_1$  та  $\omega_2$  і значення цих частот, а також відношення амплітуд цих напруг на частоті, наприклад,  $\omega_1$ , тобто  $A_{1,1}$  ( $R_0$  – опір зразкового резистора):

$$L_{екв} = \frac{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_1\omega_2(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})\cos \varphi_{1.1}}; \quad C_{екв} = \frac{(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})\cos \varphi_{1.1}}{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)};$$

$$r_{K.екв} = \frac{A_{1.1}R_0(\omega_1^2 - \omega_2^2)^2}{\omega_1\omega_2(\omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})(\omega_1 \operatorname{tg} \varphi_{1.1} - \omega_2 \operatorname{tg} \varphi_{1.2})\cos \varphi_{1.1}}; \quad R_{EP.екв} = \frac{A_{1.1}R_0}{\cos \varphi_{1.1}}.$$

Проаналізовано залежність похибок вимірювання резонансної частоти і смуги пропускання ємнісного MEMC сенсора від параметрів ВП (рис. 9). Показано, що для підвищення точності вимірювань при визначенні резонансної частоти амплітудно-фазовим методом бажано наближати значення частот  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , на яких проводяться вимірювання, до резонансної частоти  $\omega_0$  (при  $\omega_1 = 0.9\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.1\omega_0$   $\delta_{\omega_0} \approx 0.25\sigma_\varphi$ , а при  $\omega_1 = 0.6\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.5\omega_0$   $\delta_{\omega_0} = 1.7\sigma_\varphi$ ), при визначенні смуги пропускання частоти  $\omega_1$  та  $\omega_2$  вибираються з розрахунку  $\omega_2 - \omega_1 \approx (0.4 \div 0.6)\omega_0$  (при  $\omega_1 = 0.9\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.1\omega_0$   $\delta_{2\Delta\omega} \approx 2.1\sigma_\varphi$ , а при  $\omega_1 = 0.75\omega_0$  та  $\omega_2 = 1.25\omega_0$   $\delta_{2\Delta\omega} = 1.45\sigma_\varphi$ ), а частоти  $\omega_1$  і  $\omega_2$  мають знаходитись на відносно лінійній ділянці ФЧХ, тобто при проведенні вимірювань має забезпечуватися умова  $|\varphi_{1(2)}| \leq 70^\circ$ . На основі запропонованих ВП розроблено структурну схему амплітудно-фазового вимірювача еквівалентних параметрів ємнісного MEMC сенсора.

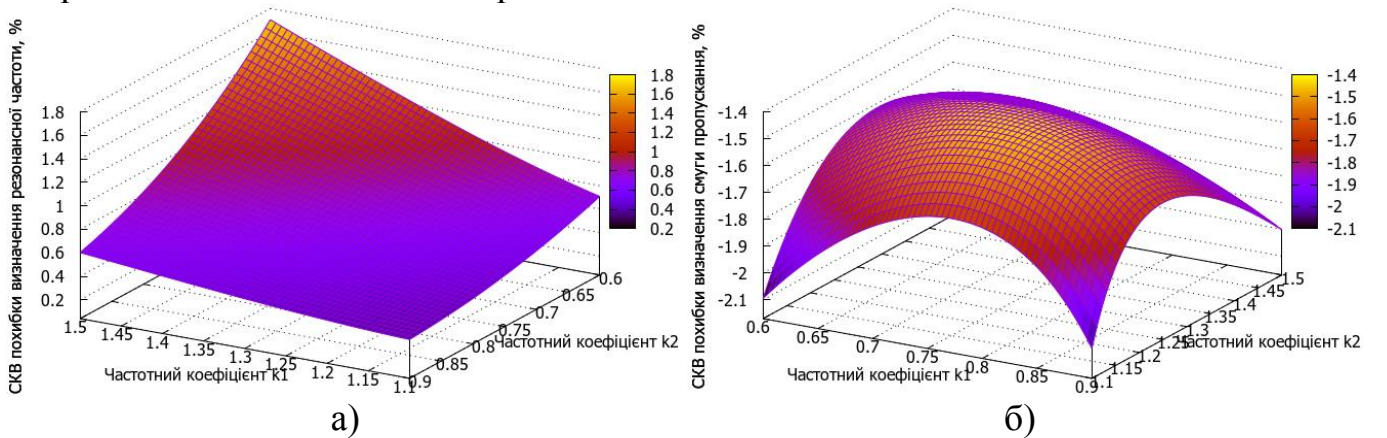


Рис. 9. Поверхні, що описують розподіл середньоквадратичних відносних похибок визначення резонансної частоти (а) та смуги пропускання (б) амплітудно-фазовим методом при  $\sigma_\varphi = 1\%$  та  $\omega_1 > \omega_0 > \omega_2$

Набув подальшого розвитку фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми, згідно з яким амплітуда перетворюється в часовий інтервал, що визначається моментами переходу гармонічного сигналу через фіксовані рівні. Показано, що даний метод можна використовувати для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг синусоїдальної форми, а похибка розроблених вимірювачів буде в основному визначатися точністю вимірювання (перетворення) часових інтервалів (імпульсних послідовностей).

Запропонована модифікована схема сигма-дельта модулятора, в якій як фіксована вхідна напруга використовується напруга збудження, а вихідний код відповідає співвідношенню ємності сенсора і опорної ємності (рис. 10). Такий новий підхід реалізує пряме підключення ємнісного сенсора до сигма-дельта перетворювача, що за-

безпечує підвищення розділової здатності, точності та лінійності перетворення. Крім того, такий інтерфейс нечутливий до величини ємності між виводами сенсора і спільним проводом або до струму витoku на спільний провід.

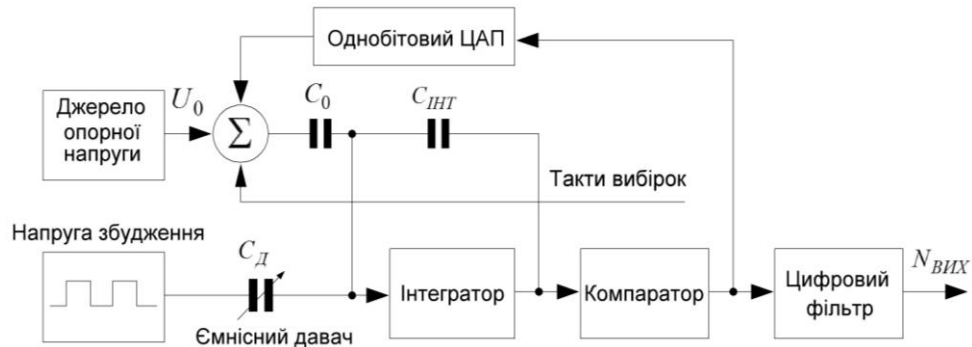


Рис. 10. Структурна схема сигма-дельта АЦП як вимірювача ємності

Розроблено варіанти схемної реалізації пристроїв для вимірювання відхилення електричної ємності MEMC сенсора від номінального значення на основі закінчених інтегральних мікросхем AD7745/AD7746 і AD7747 фірми *Analog Devices* та CAV414/424 фірми *Analog Microelectronics*, а також прецизійного аналогового мікроконтролера ADuCM360/CM361 фірми *ARM Limited*.

Розроблено методику вибору частоти дискретизації сигналів сенсорів навігаційної системи та виконавчих пристроїв в системі керування МР з врахуванням їх структурних зв'язків, що дозволяє знаходити оптимальні значення частот дискретизації сигналів. Потенційно система керування, до складу якої входять  $n$  сенсорів та  $m$  виконавчих пристроїв, може мати  $n \cdot m$  каналів керування. Основою структурного підходу до визначення частоти дискретизації сигналів системи керування є використання двох частот дискретизації, які можна встановити в кожному з  $n \cdot m$  каналів системи:  $f_{дijH}$  і  $f_{дijB}$ , які визначаються за результатами розв'язання прямої задачі розподілу похибок відносно похибки дискретизації-відновлення для кожного з  $n \cdot m$  каналів керування. Кількість частот дискретизації сенсора дорівнює кількості виконавчих пристроїв за структурою системи, на формування сигналів керування яких впливає сигнал даного сенсора, а частота дискретизації сигналу сенсора визначається максимальною з цих частот.

За даною методикою при введенні даних відбувається збільшення частоти дискретизації сигналу сенсора відносно необхідної з точки зору його частотних властивостей, похибки дискретизації-відновлення та умов відновлення інформації, що дозволяє отримати оптимальну програму опитування. На вході модуля реалізації алгоритму керування необхідно, щоб всі сенсори мали однакову частоту дискретизації, що забезпечується або задаванням всім сенсорам максимальної частоти дискретизації, або при проміжному відновленні інформації на вході модуля реалізації алгоритму керування.

**У п'ятому розділі** розроблено схеми фільтрів та алгоритми фільтрації сигналів в приладових системах вимірювання прискорення мобільних роботів.

Розроблено схему аналогового СФ (рис. 11) для ефективного придушення завади на 40 дБ, частота якої в діапазоні низьких частот відрізняється від частоти корисного сигналу не більше ніж на октаву. Розраховано параметри пасивних елементів схеми і вибрано активні елементи, необхідні для реалізації фільтра. Для розроб-

леної схеми фільтра уточнено коефіцієнти передавальної функції (ПФ), розраховано частотні характеристики і доведено можливість придушення завади більше 40 дБ.

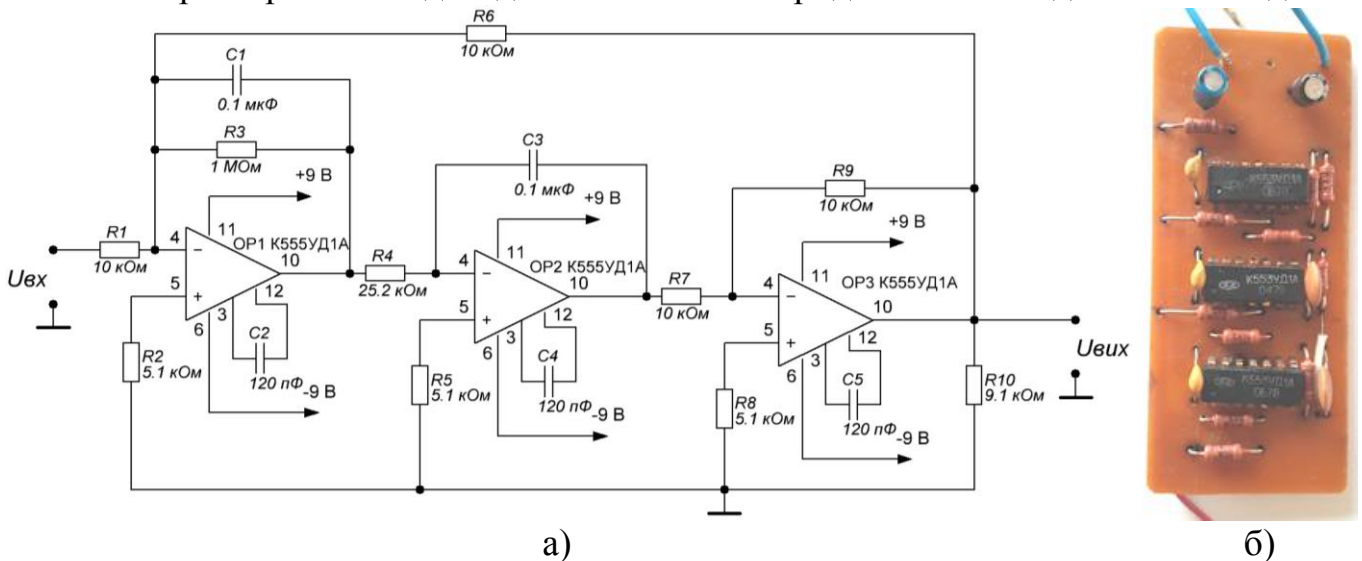


Рис. 11. Уточнена електрична схема СФ (а) і зовнішній вигляд дослідного зразка (б)

Проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади фільтра від розкиду параметрів всіх елементів схеми і доведено, що найбільший вплив на даний коефіцієнт має точність пасивних елементів схеми  $C_1$ ,  $C_3$ ,  $R_1$  і  $R_4$ . З'ясовано, що для отримання максимального коефіцієнта придушення завади СФ важливим є використання пасивних елементів з мінімальними значеннями температурних коефіцієнтів опору і ємності (ТКО та ТКЄ), при цьому максимальні значення коефіцієнта придушення завади отримують при температурі навколишнього середовища  $+(15 \div 25)^\circ\text{C}$ .

В експериментальному макеті СФ (рис. 11, б) отримано значення коефіцієнта придушення завади  $-(39 \div 40)$  дБ при крутизні спадаючої ділянки АЧХ 40 дБ/окт.

Розроблено методику визначення параметрів паразитної фазової модуляції вихідного сигналу СФ при модуляції амплітуди вхідного сигналу СФ при його розстроюванні, глибина якої залежить від величини розстройки, добротності та частоти модуляції. Показано, що залежність глибини фазової модуляції від частоти оригінальної вхідного сигналу носить резонансний характер. Отримано співвідношення для визначення параметрів паразитної фазової модуляції при модуляції амплітуди вхідного сигналу за різними законами.

Запропоновано використовувати медіанний та діагностичний фільтри на основі алгоритмів гарантованої фільтрації при обробці даних з бортової навігаційної системи МР для отримання оцінок навігаційних параметрів, “очищених” від завад (збоїв, помилок, промахів необхідної кратності). Результати застосування медіанної фільтрації сигналів  $h$  (висота) та  $\dot{h} = V_{ys}$  (вертикальна швидкість), при побудові яких використані реальні записи сигналів БІНС, отримані під час льотних випробувань, наведені на рис. 12. На верхніх графіках наявна значна кількість помилок високого рівня, викликаних регулярними пропаданнями сигналів через наявність вібрацій, недостатньо надійні контакти та ін. Нижні графіки на рис. 12, а, б отримано в результаті використання медіанного фільтра з “вікном” довжиною  $k = 3$ , при цьому виключені поодинокі збої, сигнал за каналом висоти виявився повністю “очищеним” від помилок високого рівня, а в сигналі за каналом вертикальної швидкості виключо-

чені всі помилки, крім двох (для їх виключення необхідно використовувати або додаткову фільтрацію, або медіанний фільтр з “вікном” довжиною  $k = 5$ ). Отримані результати ілюструють високу ефективність медіанної фільтрації для попередньої обробки сигналів сенсорів навігаційної інформації.

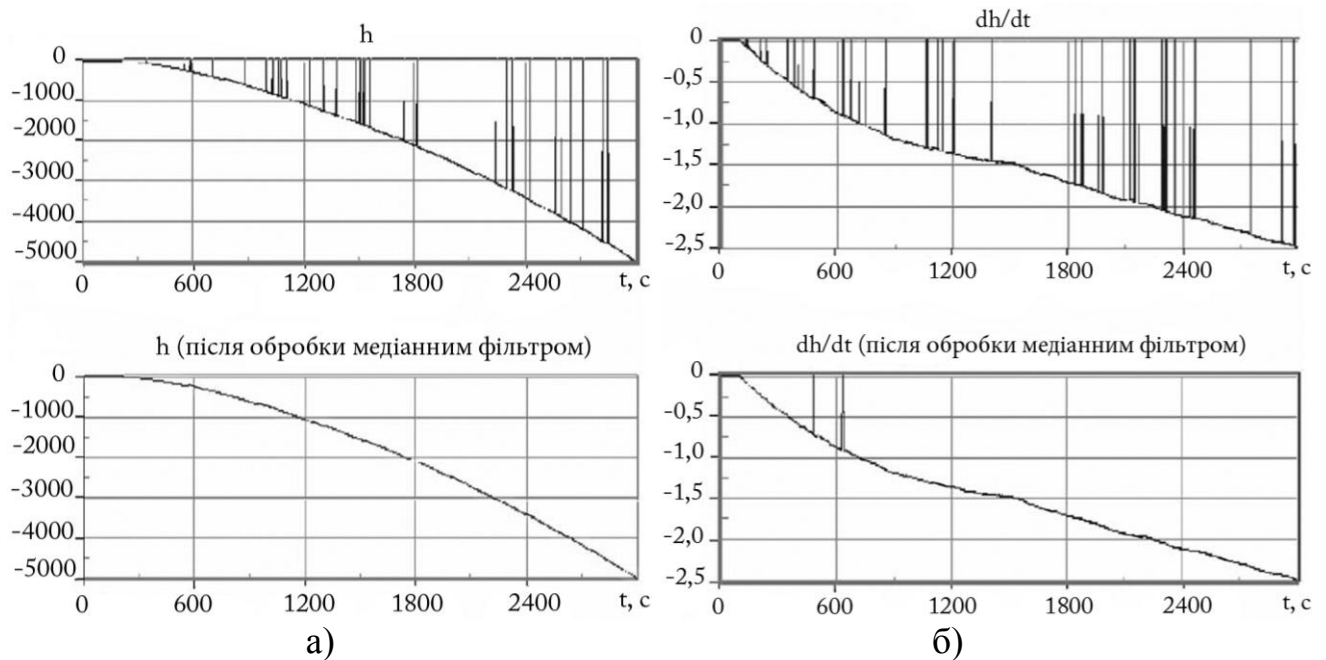


Рис. 12. Медіанна фільтрація сигналу за каналами висоти (а) та вертикальної швидкості (б)

Для мікросистем орієнтації, реалізованих тільки на акселерометрах та акселерометрах і гіроскопах, визначено умови мінімізації випадкової похибки на виході комплексованої інерціальної системи орієнтації. Отримано варіант чисельної реалізації комплементарного фільтра IBM за каналом тангажу:

$$\hat{\beta}_{k+1} = k_{K\Phi} (\hat{\beta}_k + T_0 \omega_{G.k}) + (1 - k_{K\Phi}) \beta_k^A,$$

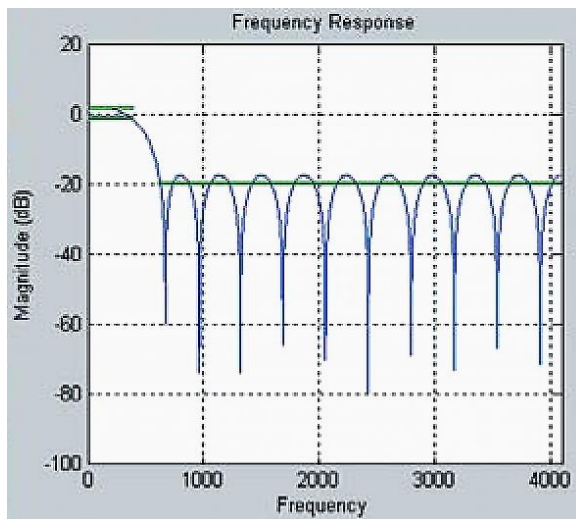
де  $\omega_{G.k}$  – сигнал гіроскопа;  $T_0$  – період дискретизації;  $\beta_k^A$  – кут, отриманий за показаннями акселерометрів;  $k_{K\Phi} = \frac{\tau}{\tau + T_0}$  – коефіцієнт дискретного комплементарного

фільтра, значення якого підбирається експериментально для даного IBM.

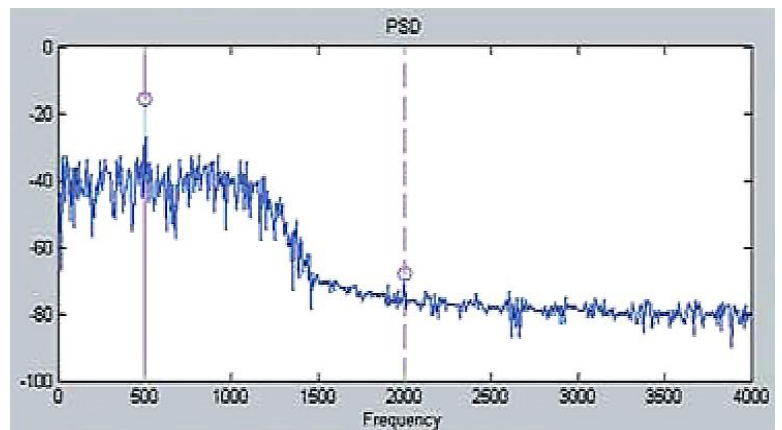
За допомогою графічного інтерфейсу користувача *GUI SPTool* програмних засобів в *MATLAB* проведено синтез оптимального ФНЧ з лінійною ФЧХ порядку  $R_{opt} = 31$  на базі КІХ-фільтра 2-го типу, аналіз синтезованого цифрового фільтра (ЦФ) (АЧХ фільтра, рис. 13, а), а також аналіз сигналів в часовій та частотній областях, в результаті якого отримано графічні залежності вхідного і вихідного сигналів ЦФ на заданому інтервалі часу  $[0; NT] = [0; N/f_d] = [0; 1024/8000] = [0; 0.128] c$  і спектральної густини потужності в основній смузі частот  $[0; f_d/2] = [0; 4000] Гц$  (рис. 13, б).

Запропоновано метод визначення оцінки параметрів стану системи в “офарбованих” шумах практично без збільшення часу обчислень. Проведений аналіз показує, що чим більше відрізняються спектри вимірювальних і системних шумів, тим менше підсумкова дисперсія оцінки параметрів стану ЗВ.





а)



б)

Рис. 13. АЧХ оптимального ФНЧ з лінійною ФЧХ (а) та спектральна густина потужності (PSD) вихідного сигналу (б)

Розроблено два варіанти реалізації інерціальних мікросистем орієнтації на основі фільтра Калмана (ФК): для контуру керування МР і для резервної системи, що мають високі технічні характеристики (табл. 3) і показали стійке функціонування при тривалій експлуатації (5 год. і більше).

Таблиця 3

Технічні характеристики інерціальних мікросистем орієнтації

Характеристика	Значення	
	на основі ФК	резервної системи
Напруга живлення, В	7...12	9, $\pm 15$
Споживаний струм, А	0.35	0.5 (9 В); 0.1 ( $\pm 15$ В)
Діапазон вимірюваних кутових швидкостей, $^{\circ}/\text{с}$	$\pm 400$	$\pm 100$
Діапазон вимірюваних прискорень, g	0...6	0...10
Діапазон визначення кутів:		
- курсу (рискання), $^{\circ}$	0...360	—
- тангажу, $^{\circ}$	$\pm 90$	$\pm 90$
- крену, $^{\circ}$	$\pm 180$	$\pm 180$
Максимальна похибка визначення кута курсу:		
- прямолінійний рух, $^{\circ}$	1.85	—
- маневрування, $^{\circ}$	2.8	—
Максимальна похибка визначення кута тангажу:		
- прямолінійний рух, $^{\circ}$	1.9	2.0
- маневрування, $^{\circ}$	2.95	3.1
Максимальна похибка визначення кута крену:		
- прямолінійний рух, $^{\circ}$	2.1	2.2
- маневрування, $^{\circ}$	2.8	2.9
Маса, г	100	750
Габаритні розміри, мм	50×50×50	80, Ø118

В шостому розділі проведено експериментальні дослідження розроблених елементів приладових систем вимірювання прискорення мобільних роботів, що підтвердило добру збіжність теоретичних та експериментальних результатів.

Розроблено ультразвуковий одноканальний далекомір, який є одним з декількох незалежних каналів вимірювання багатоканальної системи технічного зору, включеної в бортову керуючу мережу МР і призначеної для його орієнтації у просторі при переміщенні в природному середовищі або приміщенні. Структурна схема мережевого ультразвукового одноканального далекоміра наведена на рис. 14.

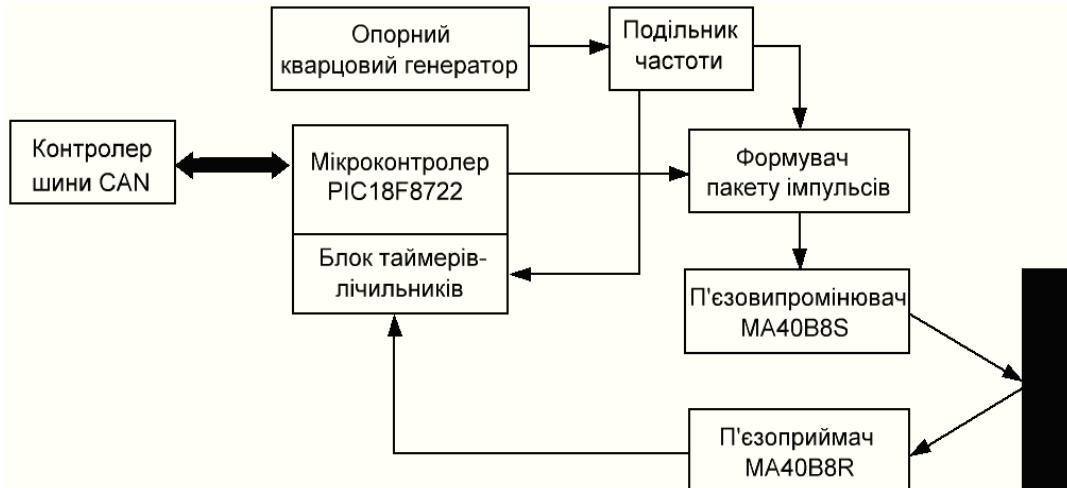
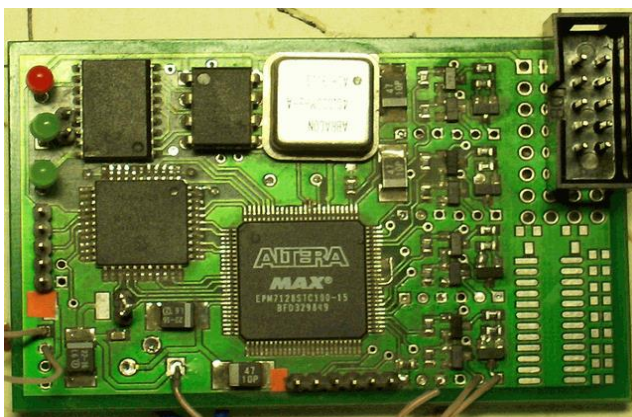


Рис. 14. Структурна схема ультразвукового одноканального далекоміра

Для перевірки працездатності сенсорного вузла далекоміра (імпульсного локатора) було проведено його попереднє макетування. В якості інтерфейсу для зв'язку з контролером-“майстром” використовується контролер шини CAN *MCP2510*. Сенсорами є п'єзоперетворювачі *MuRata MA40B8S* і *MA40B8R*, а блоки подільника частоти і формувача пакету імпульсів реалізовані на ПЛІС *EPM7128STC100* (рис. 15).



а)



б)

Рис. 15. Зовнішній вигляд друкованої плати сенсорного вузла (а) та ультразвукового прийомопередавача (б)

Для врахування впливу кліматичних факторів при визначенні швидкості ультразвуку за співвідношеннями (11) та відстані до перешкоди використовується інтегрований сенсор навколишнього середовища типу *BME280* з низьким енергоспоживанням (до 3.6 мкА при напрузі живлення (1.7÷3.6) В). Пристрій має порівняно малий час відгуку 1 с і є поєднанням трьох високолінійних точних сенсорів: низькошумового температурного сенсора для діапазону (-40...+85) °С з роздільною здатністю

$\pm 0.1$  °C і максимальною абсолютною похибкою  $\pm 0.5$  °C; абсолютного барометричного сенсор тиску для діапазону (30...1100) кПа з максимальною відносною похибкою  $\pm 1\%$  та похибкою чутливості до  $\pm 0.25\%$ ; сенсора вологості з гістерезисом до 2% відносної вологості та максимальною абсолютною похибкою  $\pm 1\%$ .

Максимальні абсолютні похибки обчислення швидкості ультразвуку на краях температурного діапазону за показаннями сенсора *BME280* складають  $\Delta \hat{V}_3(t^o, W, P)|_{-30^o C} = 0.299$  м/с та  $\Delta \hat{V}_3(t^o, W, P)|_{80^o C} = 0.307$  м/с, що приводить до відносної похибки обчислення швидкості ультразвуку в повітрі не більше 0.1% та абсолютної похибки оцінки дальності не більше 6 мм (для максимальної потужності п'єзовипромінювача).

Програмне забезпечення для мікроконтролера сенсорної плати і макетної плати «ASK Lab» написано на мові *C18* та відкомпільовано в середовищі *MPLAB 8*. Прошивка для мікросхеми ПЛІС створена в середовищі *MAX+ 10.0*.

Задача оптимізації програмного коду полягає у відмові від сторонніх бібліотек, які надають набір функцій та умов, що приводить до додаткового навантаження на мікроконтролер і зниження його обчислювальних можливостей. Дана задача розв'язана при використанні лише бібліотеки для конфігурації програмного *UART* та роботи МК по шині *CAN*, що збільшує частоту дискретизації приблизно удвічі.

Для вимірювання відстані до об'єктів було встановлено два комплекти випромінювач-приймач спереду і ззаду робота. Сам вимірювальний модуль і ноутбук також встановлені на робот. Тому що у використовуваному ноутбуку відсутній вбудований інтерфейс *RS-232*, то додатково встановлені перехідники *USB-RS232* для обміну даними між комп'ютером, основним модулем ультразвукового далекоміра і контролером робота, як це показано на рис. 16. Живлення основного модуля далекоміра і контролера робота реалізується від бортової акумуляторної батареї робота напругою 12 В через модуль перетворювача напруги 12 В – 5 В. Вихідні мости двигунів робота живляться від окремого комплекту акумуляторних батарей 12 В.



а)



б)

Рис. 16. Перехідники *USB-RS232* (а) та польові дослідження робота (б)

Отримані при експериментальних дослідженнях ультразвукового далекоміра результати підтвердили працездатність запропонованих схемотехнічних та програмних рішень. Підсумковий час реакції системи склав 0.2 с. Для даного випадку він виявився достатнім для виконання поставленої задачі, однак в цілому для систем



реального часу є великим. Тому використання ультразвукових далекомірів в динамічно змінних умовах роботи без комплексування з іншими типами приладових систем не гарантує отримання достатнього часу реакції системи, що має місце при використанні МР в польових умовах. Практичний інтерес має визначення оптимальних комбінацій різних типів сенсорів (локаційних, інерціальних, оптичних та ін.).

За результатами аналізу точності при комп'ютерному моделюванні знайдено оптимальну структуру ШНМ для визначення відстані до перешкоди (поточної координати МР), яка найкраще враховує характер і складність взаємозв'язку між вхідними (швидкість ультразвуку в повітрі та кількість лічильних імпульсів) і вихідним інформаційними параметрами. На тестувальній вибірці для ШНМ типу *Cascade-forward* з двома прихованими шарами (рис. 17) отримано середньоквадратичну  $MSE=1.412$  мм та середню абсолютну  $MAE=1.892$  мм похибки.

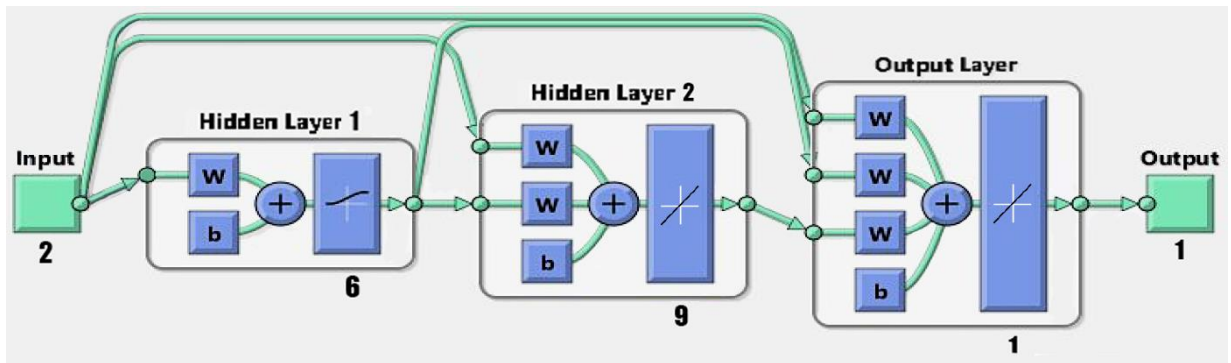


Рис. 17. Структури ШНМ типу *Cascade-forward* з двома прихованими шарами

Розрахунок значення відстані до перешкоди за результатами оцінки швидкості ультразвуку в повітрі та кількості лічильних імпульсів проводиться таким чином:

$$L = f\left(w_1^{31}f(V_3) + w_2^{31}f(N) + \sum_{n=1}^6(a_n^1w_n^{32}) + \sum_{k=1}^9(a_k^2w_k^{33}) + b^3\right);$$

$$a_n^1 = f(w_{1,n}^{11}f(V_3) + w_{2,n}^{11}f(N) + b_n^1); \quad a_k^2 = f\left(w_{1,k}^{21}f(V_3) + w_{2,k}^{21}f(N) + \sum_{n=1}^6(a_n^1w_{k,n}^{22}) + b_k^2\right),$$

де  $f$  – функція активації нейрона;  $n, k$  – порядкові номери нейронів першого та другого шарів;  $f(V_3)$ ,  $f(N)$  – приведені сигнали швидкості ультразвуку в повітрі та кількості лічильних імпульсів;  $w_i^j$  – вагові коефіцієнти нейронів;  $b_i^j$  – зсуви нейронів;  $a_n^1$ ,  $a_k^2$  – вихідні сигнали нейронів першого і другого прихованих шарів.

В додатку *Simulink* прикладного програмного забезпечення *MATLAB* отримано розгорнуту структуру ШНМ у вигляді розгорнутої блок-схеми нейромережевого алгоритму з позначеними напрямками інформаційних потоків (рис. 18).

Для проведення процедури калібрування інерціальних сенсорів створена експериментальна установка, яка складається з одноосної міні-центрифуги з встановленими на ній зразковим поворотним пристроєм і макетом *IBM MPU 6050 1*, підключеного до джерела живлення *PSM-6003 2* (задає напругу живлення в діапазоні (2,4...3,4) В), частотоміра *METEX MXC-260 3*, електронного блоку 4 та комп'ютера 5 (рис. 19). Крок зміни кута повороту складає  $10^\circ$  в діапазоні від  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , а міні-центрифуга дозволяє задавати різні значення кутової швидкості в діапазоні від 0 до  $240^\circ/\text{хв.}$  в обох напрямках обертання.

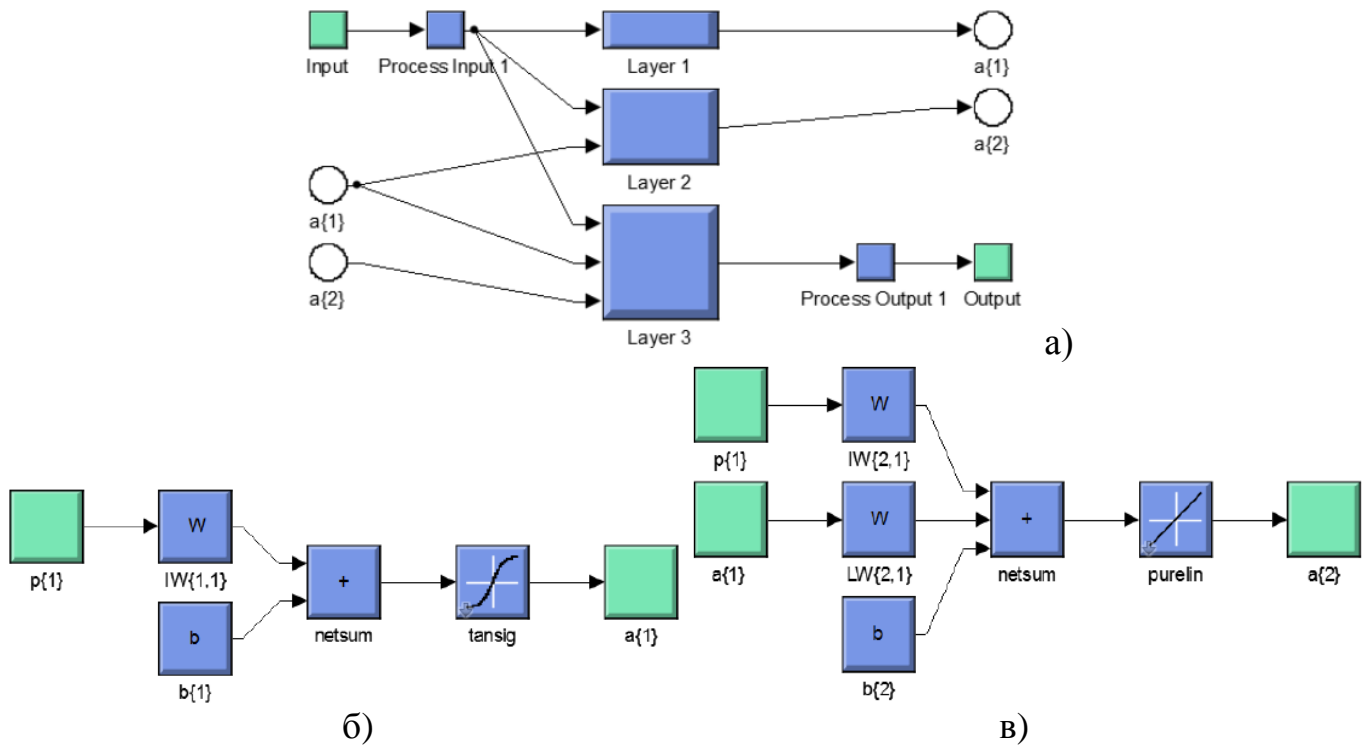


Рис. 18. *Simulink*-модель тришарової каскадної ШНМ (а) і структури першого *Layer 1* (б) та другого *Layer 2* (в) прихованих шарів

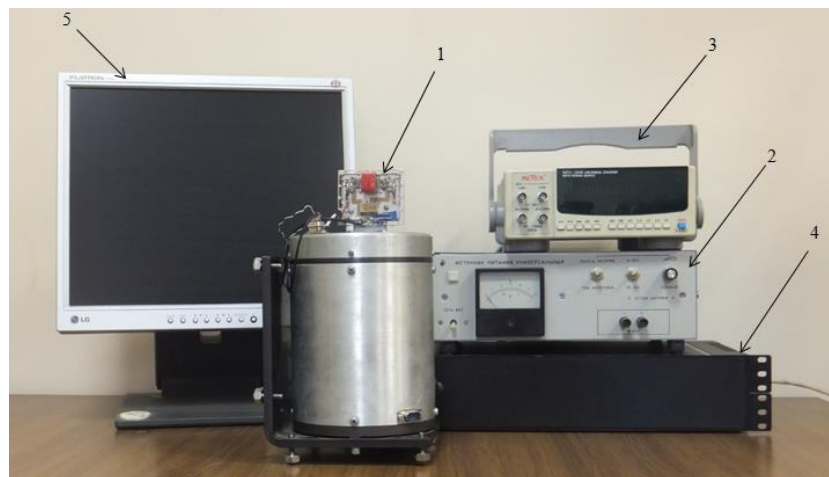


Рис. 19. Експериментальна установка для калібрування інерціальних сенсорів

В процесі калібрування ІВМ та магнітометра обчислено коригувальні коефіцієнти, врахування яких дозволяє частково компенсувати вплив різних дестабілізуючих факторів і визначити такі параметри: неточність перпендикулярності осей чутливості (обумовлена неточністю встановлення сенсора на платі), коефіцієнти перетворення для кожної осі, які трансформують вихідні коди сенсора в одиниці вимірюваної величини, а також зміщення нуля для кожної осі.

Вихідні сигнали відкаліброваних акселерометра та гіроскопа є зашумленими і за більшістю осей сенсора зміщені відносно нуля. Такі зміщення мають враховуватися при подальших обчисленнях введенням постійних корегуючих коефіцієнтів. Визначення кута при інтегруванні кутової швидкості є неточним через накопичення помилки (низькочастотний шум), а акселерометр вносить високочастотну заваду. Тому для зменшення впливу шуму необхідним є обробка даних акселерометра і гіроскопа альфа-бета фільтром або фільтром Калмана.

Після проведення процедури калібрування показань магнітометра при його обертанні на  $360^\circ$  утворюється фігура, близька до кола з центром в початку координат, проекції магнітної індукції МПЗ на осі чутливості магнітометра залежно від кута курсу змінюються за гармонічними функціями, а їх коливання відбуваються відносно осі абсцис. Визначені параметри моделі сенсора можна використовувати для визначення вихідних сигналів магнітометра при інтеграції до програмного коду. Недоліком такої корекції є те, що компенсація магнітних девіацій відбувається тільки при збереженні конкретного місця установки сенсора.

Розроблена локальна навігаційна система автономного МР (рис. 20), призначена для визначення відносних координат об'єкту і параметрів його переміщення на короткому часовому інтервалі до 10 хв., контролю переміщення по безпечній траєкторії в обмеженому просторі та навігації МР при відсутності даних від зовнішніх джерел навігації (відмові системи позиційного корегування на базі GPS). Для таких систем точнісні характеристики інерціальних сенсорів є менш важливими, ніж вимоги до апаратури автономних об'єктів – масогабаритні та цінові характеристики, надійність, стійкість до ударів, вібрацій та ін.

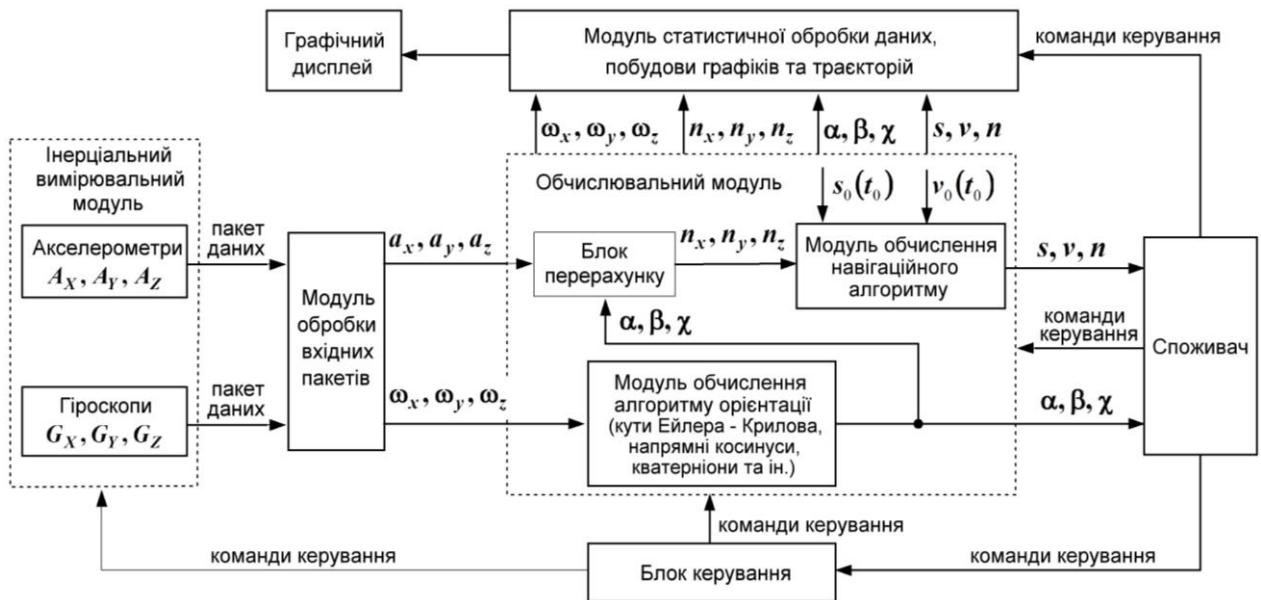


Рис. 20. Структурна схема локальної навігаційної системи

В математичній моделі розробленої ЛНС враховано ряд особливостей, що впливають на визначення навігаційних параметрів МР (найчастіше колісних): відсутність бічного зносу; малі діапазони зміни кутів тангажу і крену протягом коротких часових інтервалів; незалежність кутової швидкості обертання навколо вертикальної осі МР від кутових швидкостей обертання навколо інших осей; невелика лінійна швидкість переміщення МР, тобто отримано таку математичну модель МР:

$$\dot{\alpha} = \omega_z; \quad \dot{\beta} = \omega_x \cos \chi + \omega_z \sin \chi; \quad \dot{\chi} = \omega_y;$$

$$n_x = a_x \cos \chi + a_z \sin \chi; \quad n_y = a_x \sin \beta \sin \chi + a_y \cos \beta - a_z \sin \beta \cos \chi;$$

$$n_z = -a_x \cos \beta \sin \chi + a_y \sin \beta + a_z \cos \beta \cos \chi - g;$$

$$v(t_1) = v_0(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} n_y dt; \quad s(t_1) = s_0(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} n_y dt,$$

де  $v_0(t_0)$ ,  $s_0(t_0)$  – початкові значення швидкості та координати в момент часу  $t_0$ .

Для експериментального налаштування параметрів ЛНС та перевірки точності обчислення навігаційних параметрів МР реалізовано фізичну модель системи, яка є комбінацією ІВМ (по три МЕМС акселерометри і гіроскопи) та приймача СРНС з вбудованою антеною і призначена для визначення координат і кутів орієнтації об'єкту. Використання такої системи без приймача СРНС аналогічно автономному режиму роботи. Для реалізації функцій обчислювального модуля, модуля обробки вхідних пакетів та блоку керування розроблено відповідне програмне забезпечення.

На основі даної фізичної моделі проведений ряд експериментальних досліджень, результати яких наведені на рис. 21 та рис. 22, що дозволяє зробити висновки про такі якісні характеристики розробленої ЛНС:

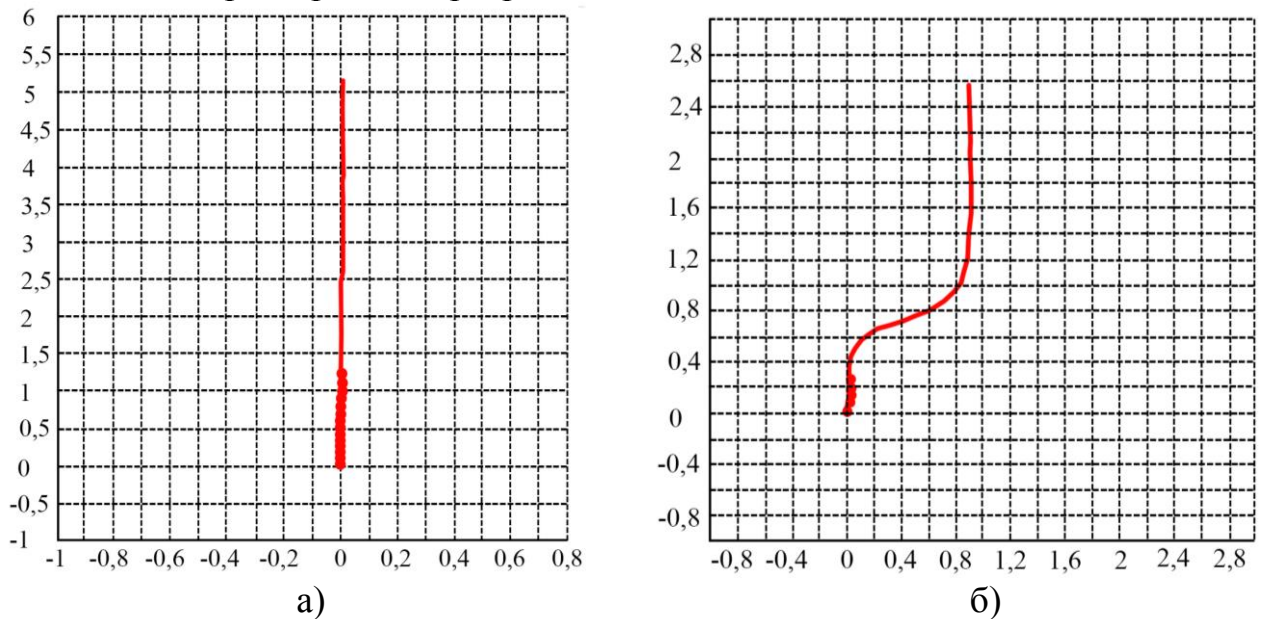


Рис. 21. Траєкторії об'єкту, отримані за фізичною моделлю при прямолінійному переміщенні (а) та при маневруванні (б)

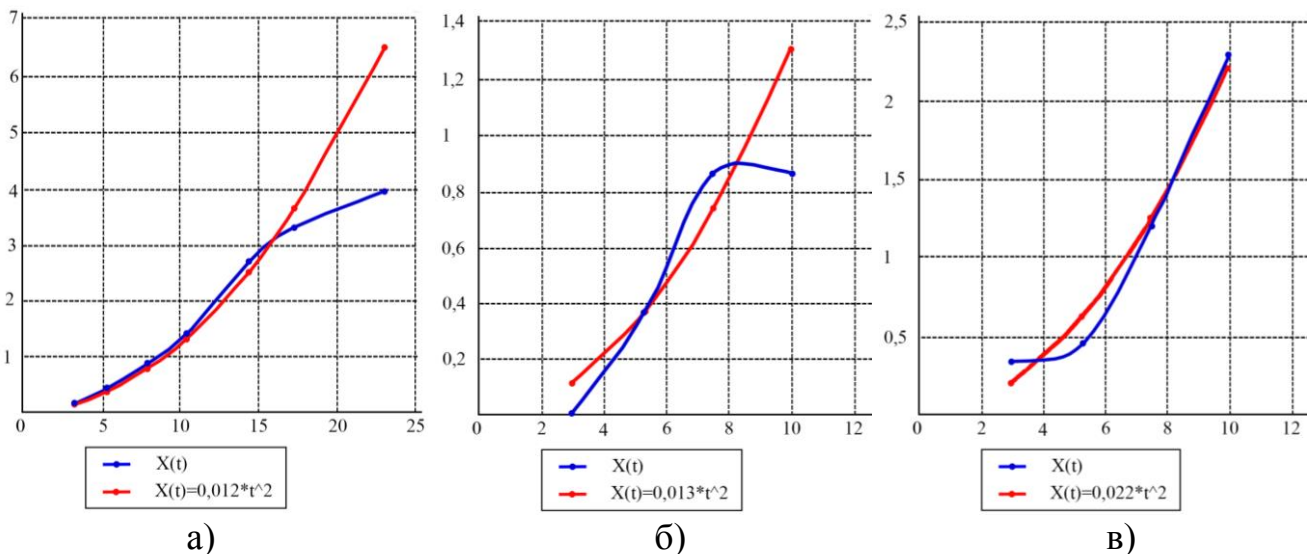


Рис. 22. Залежності помилок визначення координат об'єкту від часу (сині криві) та функції, що їх апроксимують (червоні криві) при прямолінійному переміщенні (а) та при маневруванні (б, в)

- траєкторія об'єкту, побудована за обчисленими навігаційними параметрами, і



реально пройдений маршрут, ідентичні (адекватна робота ЛНС як вказівника курсу);  
 - похибка визначення координат об'єкту ЛНС в автономному режимі має величину  $0.012t^2$  (1.2 м за 10 с) при прямолінійному русі і  $0.022t^2$  (2.2 м за 10 с) при маневруванні, а відпрацювання кутів орієнтації МР відбувається з точністю  $(0.1 \div 0.3)^\circ$  для кутів крену і тангажу і  $(2 \div 3)^\circ$  для кута курсу;

- точнісні характеристики розробленої фізичної моделі ЛНС аналогічні паспортним даним серійних БІНС, а в деяких випадках за рахунок врахування особливостей навігації МР показують дещо кращу точність.

В подальшому планується вдосконалення математичної моделі та алгоритму обробки інформації й програмного забезпечення для обчислення навігаційних параметрів об'єкту з метою підвищення точності системи, а також практична реалізація вдосконаленої системи та інтегрування її в навігаційний комплекс для наземних МР.

**В загальних висновках** підсумовано основні результати досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих в лабораторних умовах.

**В додатках** приведені акти впровадження результатів дисертаційної роботи, результати експериментальних досліджень, електричні схеми розроблених вузлів та модулів приладових систем МР, а також лістинги програмного забезпечення.

## **ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ**

В дисертаційній роботі вирішено важливу та складну науково-прикладну проблему підвищення точності вимірювання прискорення приладової системи мобільного робота за рахунок розробки нових методів і засобів вимірювання. Найбільш значимими науковими та практичними результатами роботи є такі.

1. Отримані нові теоретичні та практичні результати по розробці приладових систем вимірювання прискорення мобільного робота при впливі таких дестабілізуючих факторів, як кліматичні (температура, тиск, вологість), шуми, завади і вібрації, і доведено, що при врахуванні властивостей МЕМС акселерометра можна підвищити технічні параметри таких систем щодо їх здатності детектувати нахил, параметри руху, положення, вібрацію та удар.

2. Розвинуто теоретичні засади методів вимірювання прискорення мобільних роботів та проаналізовано способи підвищення їх точності.

Отримав розвиток метод визначення параметрів руху МР, згідно з яким загальна кількість координат об'єкта на інтервалі часу ділиться на групи з однаковою кількістю координат (дві для швидкості, три для прискорення і чотири для різкості), а коди координат в групах усереднюються. Проаналізовано ефективність методу залежно від кількості використовуваних для обчислень координат.

Запропоновано математичну модель впливу робочих умов (середовища) на коефіцієнт чутливості ЗВ. Проаналізовано відхилення коефіцієнта чутливості засобу вимірювання від номінального значення залежно від групи факторів та кількості членів розкладу функції в ряд Тейлора.

Складено бюджет похибок визначення псевдодальності, псевдошвидкості і псевдоприскорення дальномірними методами за допомогою СРНС і з'ясовано потенційні значення їх сумарних похибок (відповідно 6.3 м, 0.09 м/с та 0.0238 м/с<sup>2</sup>).

Вперше отримано математичну модель залежності швидкості ультразвуку в

повітрі від групи кліматичних факторів та швидкості вітру. З'ясовано, що на вихідний сигнал п'єзовипромінювача суттєво впливає зміна температури повітря, а також менш значуще атмосферний тиск і відносна вологість.

Запропоновано використовувати мережеву архітектуру, в якій для зменшення навантаження на джерела живлення і обчислювальні блоки МР сигнали надходять від сенсорних вузлів до блоків системи керування у вже обробленому вигляді.

3. Проведено аналіз та математичне моделювання похибок MEMS акселерометрів приладових систем мобільних роботів.

Розроблені математичні моделі MEMS акселерометра в різних формах (механічна, електрична і схемотехнічна), проведена оцінка параметрів електричної моделі та доведена її адекватність. Показано, що використання "індивідуальних" моделей MEMS акселерометра MMA7331LT підвищує точність визначення прискорення з 14% для паспортних даних до 3.5% для "індивідуальних" моделей.

Деталізовано узагальнене рівняння похибок акселерометрів БІНС і складено блок-схему формування похибок у вихідному сигналі акселерометрів. Проаналізовано складові випадкової похибки акселерометрів та наведено моделі формування складових випадкової похибки з білого шуму та білої послідовності.

Розроблено методику оцінки похибок одноканальної БІНС на короткому часовому інтервалі за значеннями інструментальних похибок інерціальних сенсорів без моделювання алгоритму інерціальної системи і доведено, що MEMS гіроскопи з часом накопичують значно більші похибки визначення параметрів руху і орієнтації порівняно з акселерометрами такого самого класу точності.

Розроблено методику оцінки мінімального значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової методом усереднення і визначення оптимального часу усереднення за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для обчислення варіації Алана за результатами обробки інформації інерціальних сенсорів при тривалих запусках з подальшою поліноміальною апроксимацією, що важливо при калібруванні таких сенсорів і ефективно ідентифікує структуру шумів в каналі ЗВ.

Деталізовано модель похибок БІНС при визначенні швидкості і координат МР, на основі якої розроблено узагальнену блок-схему формування похибок БІНС при визначенні параметрів руху об'єкта. Показано, що точність визначення лінійних швидкостей і координат визначається похибками орієнтації, а величина похибок БІНС залежить від динаміки руху об'єкта.

4. Розроблено пристрої обробки сигналів MEMS сенсорів приладових систем мобільних роботів та алгоритми їх роботи.

Розроблено пристрої обробки сигналів ємнісних MEMS сенсорів приладових систем МР на основі генераторного нульового методу, в яких підвищується стійкість до впливу шумів і забезпечується висока чутливість та часткова компенсація температурних змін вихідної частоти.

Вперше запропоновано визначати параметри ємнісних MEMS сенсорів, заданих еквівалентними схемами резонансних контурів, за результатами вимірювань кута фазового зсуву між двома напругами на виході перетворювача та відношення амплітуд цих напруг (схеми перетворювачів захищені патентами України на винахід №57135 і №57836). Проаналізовано залежність похибок вимірювання параметрів ємнісного MEMS сенсора від параметрів вимірювального перетворювача.

Набув подальшого розвитку фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги, який в роботі використовується для вимірювання відношення амплітуд змінних напруг. Похибки розроблених засобів вимірювання в основному визначаються точністю вимірювання (або перетворення) часових інтервалів.

Розроблено методику вибору частоти дискретизації сигналів сенсорів і виконавчих пристроїв в системі керування МР з врахуванням їх структурних зв'язків, що дозволяє знаходити оптимальні значення частот дискретизації сигналів та отримати оптимальну програму опитування.

5. Розроблено схеми фільтрів та алгоритми фільтрації сигналів в приладових системах вимірювання прискорення мобільних роботів.

Розроблено схему аналогового СФ для ефективного придушення завади на 40 дБ, частота якої в діапазоні низьких частот відрізняється від частоти корисного сигналу не більше ніж на октаву. Проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади фільтра від розкиду параметрів всіх елементів схеми. В експериментальному макеті фільтра отримано значення коефіцієнта придушення завади  $-(39\div 40)$  дБ при крутизні спадаючої ділянки АЧХ 40 дБ/окт.

Розроблено методику визначення параметрів паразитної фазової модуляції при модуляції амплітуди вхідного сигналу СФ при його розстроюванні.

Запропоновано використовувати медіанний та діагностичний фільтри на основі алгоритмів гарантованої фільтрації при обробці даних з бортової навігаційної системи МР для отримання оцінок навігаційних параметрів, “очищених” від завад. Результати застосування медіанної фільтрації демонструють її високу ефективність для попередньої обробки сигналів сенсорів навігаційної інформації.

Визначено умови мінімізації випадкової похибки на виході комплексованої інерціальної системи орієнтації. Отримано варіант чисельної реалізації комплементарного фільтра ІВМ. Синтезовано оптимальний ФНЧ з лінійною ФЧХ порядку  $R_{opt} = 31$  на базі КІХ-фільтра 2-го типу.

Розроблено два варіанти реалізації інерціальних мікросистем орієнтації на основі фільтра Калмана (для контуру керування МР і для резервної системи), що мають високі технічні характеристики і показали стійке функціонування при тривалій експлуатації (5 год. і більше). Запропоновано метод, який дозволяє проводити оцінку параметрів стану системи в “офарбованих” шумах практично без збільшення часу обчислень.

6. Проведено експериментальні дослідження розроблених елементів приладових систем вимірювання прискорення мобільних роботів, що підтвердило добру збіжність теоретичних та експериментальних результатів.

Використання ультразвукових далекомірів в динамічно змінних умовах роботи без комплексування з іншими типами приладових систем не гарантує отримання достатнього часу реакції системи, що має місце при використанні МР в польових умовах. Практичний інтерес має визначення оптимальних комбінацій різних типів сенсорів (локаційних, інерціальних, оптичних та ін.).

За результатами аналізу точності при комп'ютерному моделюванні знайдено оптимальну структуру ШНМ типу *Cascade-forward* з двома прихованими шарами для визначення відстані до перешкоди, яка найкраще враховує характер і складність взаємозв'язку між інформаційними параметрами. Розроблено *Simulink*-модель даної

ШНМ, а на тестувальній вибірці отримано середньоквадратичну  $MSE=1.412$  мм та середню абсолютну  $MAE=1.892$  мм похибки.

Розроблено методику визначення корегувальних коефіцієнтів для IBM та магнітометра, що визначаються під час калібрування і використовуються при інтеграції до програмного коду обчислювача для визначення їх вихідних сигналів.

Забезпечувана розробленою ЛНС точність визначення параметрів руху і кутів орієнтації МР дозволяє використовувати її як автономно для контролю маневрів при переміщенні за безпечним маршрутом протягом коротких інтервалів часу, так і в комплексі з іншими навігаційними пристроями.

Напрями теоретичних і практичних досліджень дисертаційної роботи доцільно розвивати у галузі проектування і застосування приладових систем вимірювання параметрів руху та орієнтації в МРТК різного призначення.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

*Монографія:*

1. Рудик, А. В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота. Монографія / А. В. Рудик, В. П. Квасніков. – Харків : Мачулін, 2018. – 272 с.

*Статті у фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:*

2. Рудик, А. В. Пристрої для вимірювання електричної ємності мікромеханічних давачів навігаційних систем мобільних роботів та її відхилення від номінального значення / А. В. Рудик // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 3 (78). – С. 93-103. Індексация *WorldCat*, *BASE*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *eLibrary*, *Google Scholar*, *Research Bid*, *UIF*.

3. Rudyk, A. V. Analysis of the errors of MEMS accelerometers by the Allan variation method / A. V. Rudyk // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 1. – С. 100-109. Індексация *WorldCat*, *BASE*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *eLibrary*, *Google Scholar*, *ResearchBid*, *UIF*.

4. Рудик, А. В. Методика вибору частоти дискретизації сигналів давачів навігаційної системи та виконавчих пристроїв мобільних робототехнічних комплексів / А. В. Рудик // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2017. – № 1 (245). – С. 166-173. Індексация *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *РИНЦ*, *Polish Scholarly Bibliography*.

5. Рудик, А. В. Математична модель похибок акселерометрів безплатформної інерціальної навігаційної системи / А. В. Рудик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 2. – С. 7-13. Індексация *Index Copernicus*, *РИНЦ*.

6. Рудик, А. В. Зв'язок точності оцінювання постійної складової похибки MEMS акселерометрів з варіацією Алана / А. В. Рудик // Вісник Приазовського державного технічного університету (Маріуполь). – 2017. – №35. – С. 212-220. Індексация *Index Copernicus*, *РИНЦ*, *World Cat*, *BASE*, *Ulrich's Periodicals Directory*, *Google Scholar*, *ResearchBid*, *DOAJ*, *CiteFactor*, *DRJI*.

*Статті у фахових виданнях:*

7. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання добротності реактив-



них елементів / А. В. Рудик // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 1999. – № 11. – С. 106-114.

8. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів високо-частотних резонансних контурів / А. В. Рудик, О. М. Возняк, І. В. Барановський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – 2001. – № 2 (11). – С. 137-143.

9. Рудик, А. В. Резонансний метод визначення добротності варикапів / А. В. Рудик, С. М. Павлов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2003. – № 3. – С. 81-85.

10. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів / А. В. Рудик, О. О. Семенова, А. О. Семенов // Вісник Інженерної академії України. – 2013. – № 2. – С. 276-281.

11. Рудик, А. В. Використання фільтра Тоу для фільтрації низькочастотних вузькосмугових процесів / А. В. Рудик, В. А. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – № 2. – С. 126-130.

12. Рудик, А. В. Аналіз зміни характеристик фільтра Тоу / А. В. Рудик, В. А. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – № 3-4. – С. 129-134.

13. Рудик, А. В. Методи вимірювання координат та параметрів руху об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем / А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – № 4. – С. 51-56.

14. Рудик, А. В. Багатофункціональні сенсори для мобільної робототехніки / А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – № 1. – С. 30-36.

15. Рудик, А. В. Використання медіанної та діагностичної фільтрацій в мобільних робототехнічних комплексах для попередньої обробки сигналів / А. В. Рудик // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2016. – № 1 (8). – С. 73-78.

16. Квасніков, В. П. Врахування робочих умов вимірювання параметрів руху об'єктів в математичній моделі формування результату вимірювання / В. П. Квасніков, А. В. Рудик // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2016. – № 2 (9). – С. 41-45.

17. Рудик, А. В. Оцінка точності навігаційно-часових визначень в супутникових радіонавігаційних системах / А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – № 3. – С. 39-45.

18. Квасніков, В. П. Математичні моделі MEMS-акселерометра / В. П. Квасніков, А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2016. – № 4. – С. 86-92.

19. Квасніков, В. П. Практична оцінка похибок одноканальної безплатформної інерціальної навігаційної системи на MEMS-сенсорах на короткому часовому інтервалі / В. П. Квасніков, А. В. Рудик // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – № 1. – С. 190-196.

20. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів високодобротних ємнісних MEMS-сенсорів / А. В. Рудик, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – № 2. – С. 198-204.

21. Рудик, А. В. Калібрування магнітометра Honeywell HMC5883L / А. В. Рудик, В. П. Квасніков // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – № 3. – С. 208-214.

*Патенти України на винахід:*

22. Патент на винахід №57135 (Україна), МКІ G01R 25/00. Спосіб вимірювання основних параметрів послідовних резонансних контурів / А. В. Рудик. – Реєстрац. номер заявки 2000105962. Оpubліковано в бюлетені №6 від 16.06.2003.

23. Патент на винахід №57795 (Україна), МКІ G01R 25/00. Спосіб вимірювання добротності реактивних елементів / А. В. Рудик. – Реєстрац. номер заявки 2000020904. Оpubліковано в бюлетені №7 від 15.07.2003.

24. Патент на винахід №57836 (Україна), МКІ G01R 25/00. Спосіб вимірювання основних параметрів паралельних резонансних контурів / А. В. Рудик. – Реєстрац. номер заявки 2000105975. Оpubліковано в бюлетені №7 від 15.07.2003.

*Оpubліковані праці апробаційного характеру:*

25. Рудик, А. В. Фазовий метод вимірювання добротності резонансних контурів / А. В. Рудик // Прогресивні матеріали, технології та обладнання в приладобудуванні. Тези доповідей 4-ої НТК. – Тернопіль : ТДТУ, 2000. – С. 81.

26. Рудик, А. В. Амплітудно-фазовий метод вимірювання параметрів резонансних контурів / А. В. Рудик // Контроль і управління в складних системах. Тези доповідей 6-ої МНТК. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2001. – С. 100.

27. Рудик, А. В. Вимірювання шумів операційних підсилювачів / А. В. Рудик // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування. Матеріали 1-ої міжнародної НТК. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – С. 14-15.

28. Рудик, А. В. Вплив високочастотної фільтрації на стабільність частоти / А. В. Рудик, В. К. Задорожний // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2005). Матеріали 1-ої міжнародної НТК. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – С. 16-17.

29. Рудик, А. В. До визначення точності результатів вимірювань / А. В. Рудик, О. О. Дрючин, А. О. Семенов // Наука і освіта-2005. Матеріали 8-ої міжнародної НПК. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2005. – Т. 62. – С. 35-37.

30. Рудик, А. В. Вплив високочастотної фільтрації на фазові флуктуації / А. В. Рудик // Найновітє постиження на європейската наука. Матеріали 7-ої міжнародної НПК. – Софія : Бял ГРАД-БГ ООД, 2011. – Т. 42. – С. 39-41.

31. Рудик, А. В. Резонансний метод вимірювання параметрів еквівалентної схеми варикапа / А. В. Рудик // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси. Матеріали 5-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2012. – С. 155-157.

32. Рудик, А. В. Метод вимірювання шумів операційних підсилювачів / А. В. Рудик, В. А. Рудик, В. М. Михалко // Авіа-2013. Матеріали 6-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2013. – С. 1.77-1.80.

33. Рудик, А. В. Використання фільтрів Калмана для обробки шумових процесів / А. В. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013). Матеріали 6-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2013. – С. 202-204.

34. Рудик, А. В. Аналіз зміни характеристик фільтра Тоу при розкиді параметрів елементів схеми / А. В. Рудик, В. А. Рудик, А. О. Семенов, О. О. Семенова // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2014). Матеріали 7-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2014. – С. 120-122.

35. Рудик, А. В. Методи оцінки просторового положення об'єктів / А. В. Рудик

// Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2016). Матеріали 9-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2016. – С. 31-33.

36. Рудик, А. В. Оцінка швидкості ультразвуку в повітрі при реалізації системи ультразвукового зору / А. В. Рудик // Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка (ІТАЕ-2016). Матеріали міжнародної НПК. – Рівне : НУВГП, 2016. – С. 273-275.

37. Rudyk, A. V. Characterization of objects moving in the decomposition of functions in Fourier series / A. V. Rudyk, V. P. Kvasnikov // The seventh world congress “Aviation in the XXI-st century”. Safety in Aviation and Space Technologies. – National Aviation University, Kyiv, Ukraine, 2016. – pp. 1.9.6-1.9.10.

38. Рудик, А. В. Модель стану безплатформенної інерціальної навігаційної системи / А. В. Рудик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-2016). Матеріали 16-ої міжнародної НТК. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2016. – С. 150.

39. Рудик, А. В. Інтегральні перетворювачі відхилення електричної ємності від номінального значення / А. В. Рудик // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій. Тези доповідей 8-ої міжнародної НПК. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – С. 67-68.

40. Рудик, А. В. Пристрій обробки сигналів мікромеханічних датчиків навігаційних систем / А. В. Рудик, А. І. Шлома // Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2016). Тези доповідей 10-ої міжнародної НТК. – Харків : ННЦ «Інститут метрології», 2016. – С. 73.

41. Рудик, А. В. Оптимізація алгоритму опитування датчиків навігаційної системи мобільного робототехнічного комплексу в аналоговому інтерфейсі / А. В. Рудик // Збірник наукових праць 6-ої міжнародної науково-практичної конференції «Метрологія, технічне регулювання, якість: досягнення та перспективи». – Одеса : ФОП Бондаренко М. О., 2016. – С. 158-163.

42. Рудик, А. В. Методи вимірювання швидкості та прискорення / А. В. Рудик // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2017). Матеріали 10-ої міжнародної НПК. – Київ : НАУ, 2017. – С. 25÷27.

43. Рудик, А. В. Акселерометричні інерціальні мікросистеми орієнтації / А. В. Рудик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (ВОТТП-17-2017). Матеріали 17-ої міжнародної НТК. – Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2017. – С. 103-105.

44. Рудик, А. В. Розробка локальної навігаційної системи наземного мобільного робота / А. В. Рудик // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування (СПРТП-2017). Матеріали 6-ої міжнародної НТК. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – С. 75-76.

45. Рудик, А. В. Порівняльний аналіз точнісних характеристик класичної та акселерометричних інерціальних навігаційних систем / А. В. Рудик // Вимірювання, контроль і діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017). Матеріали 4-ої міжнародної НТК. – Вінниця : ПП «ТД«Едельвейс і К», 2017. – С. 209-210.

*Статті у інших виданнях:*

46. Рудик, А. В. Методика аналізу похибок відтворення сигналу фільтром синтезу цифро-аналогового перетворювача / А. В. Рудик, Я. В. Суп'ян // Вісник Вінни-

цького політехнічного інституту. – 1997. – № 2. – С. 70-76.

47. Суп'ян, В. Я. Фазові співвідношення при множенні частоти сигналів / В. Я. Суп'ян, А. В. Рудик, І. В. Барановський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 1999. – № 1. – С. 5-11.

48. Рудик, А. В. Методика визначення фазової нестабільності вихідного сигналу резонансного фільтра / А. В. Рудик, І. В. Барановський, Г. І. Майхрук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 2000. – № 1. – С. 51-54.

49. Суп'ян, В. Я. Вимірювання несучої частоти сигналу з амплітудно-імпульсною модуляцією / В. Я. Суп'ян, А. В. Рудик, Я. В. Суп'ян, О. В. Суп'ян // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 2000. – № 4. – С. 54-59.

50. Рудик, А. В. Використання фільтрів Калмана у вимірювальних системах / А. В. Рудик, О. О. Дрючин // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4. – Ч. 1. – Т. 1. – С. 225-229.

51. Рудик, А. В. Фазочастотний метод вимірювання амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми / А. В. Рудик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 2015. – № 4. – С. 96-102. Індексція *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *РИНЦ*.

52. Рудик, А. В. Використання стелс-технологій в мобільних робототехнічних комплексах та методи виявлення малопомітних об'єктів / А. В. Рудик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 2016. – № 2. – С. 146-150. Індексція *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *РИНЦ*.

53. Рудик, А. В. Пристрої обробки сигналів мікромеханічних давачів навігаційних систем / А. В. Рудик // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 4 (76). – С. 189-199.

54. Рудик, А. В. Спосіб визначення параметрів руху об'єкта на кінцевому інтервалі часу / А. В. Рудик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 2017. – № 1. – С. 49-54. Індексція *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *РИНЦ*.

55. Рудик, А. В. Синтез та моделювання цифрових фільтрів програмними засобами MATLAB / А. В. Рудик // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (Хмельницький). – 2017. – № 3. – С. 87-93. Індексція *Index Copernicus*, *Google Scholar*, *РИНЦ*.

## АНОТАЦІЯ

**Рудик А.В. Наукові основи та принципи побудови приладової системи вимірювання прискорення мобільного робота.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему підвищення точності вимірювання прискорення приладової системи мобільного робота (МР) за рахунок розробки нових методів і засобів вимірювання (ЗВ).

Отримав подальший розвиток метод визначення параметрів руху МР з усередненням кодів координат на інтервалі часу, ефективність якого залежить від кількості використовуваних для обчислень координат. Запропоновано математичні моделі впливу робочих умов (середовища) на коефіцієнт чутливості ЗВ та залежності швидкості ультразвуку в повітрі від групи кліматичних факторів і швидкості вітру. Деталізовано узагальнене рівняння похибок акселерометрів БІНС, проаналізовано складові випадкової похибки акселерометрів і наведено моделі їх формування з білого шуму і білої послідовності. Отримала подальший розвиток методика оцінки похибок БІНС на короткому часовому інтервалі за значеннями інструментальних похибок інерціальних сенсорів без моделювання алгоритму БІНС. Розроблено методику оцінки мінімального значення дисперсії похибки оцінювання постійної складової варіації Алана методом усереднення і визначення оптимального часу усереднення. Запропоновано визначати еквівалентні параметри ємнісних МЕМС сенсорів за результатами вимірювань кута фазового зсуву між напругами на виході перетворювача та відношення амплітуд цих напруг. Отримав подальший розвиток фазочастотний метод вимірювання амплітуди та відношення амплітуд змінних напруг. Удосконалено методику вибору оптимальної частоти дискретизації сигналів сенсорів і виконавчих пристроїв в системі керування МР з врахуванням їх структурних зв'язків.

Розроблено, навчено і проаналізовано штучну нейронну мережу для визначення відстані МР до перешкоди, яка найкраще враховує характер і складність взаємозв'язку між інформаційними параметрами. Проведено експериментальні дослідження створених ЗВ та калібрування інерціальних сенсорів, що підтверджують адекватність розроблених теоретичних положень та ефективність запропонованих методів.

**Ключові слова:** прискорення, приладова система, мобільний робот, акселерометр, інерціальний сенсор, безплатформна інерціальна навігаційна система (БІНС), оцінка параметрів руху, варіація Алана, фільтрація сигналів, калібрування.

## АННОТАЦИЯ

**Рудык А.В. Научные основы и принципы построения приборной системы измерения ускорения мобильного робота.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.01 – приборы и методы измерения механических величин. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2018.

В диссертационной работе решена научно-проблема повышения точности измерения ускорения приборной системы мобильного робота (МР) за счёт разработки новых методов и средств измерения (СИ).

Получил дальнейшее развитие метод определения параметров движения МР с усреднением кодов координат на интервале времени, эффективность которого зависит от количества использованных для вычислений координат. Предложены математические модели влияния рабочих условий (среды) на отклонение коэффициента чувствительности СИ от номинального значения и зависимости скорости ультразвука в воздухе от группы климатических факторов и скорости ветра. Детализировано обобщённое уравнение погрешностей акселерометров БИНС, составлена блок-схема формирования погрешностей в выходном сигнале акселерометров, а также проана-

лизированы составляющие случайной погрешности акселерометров и представлены модели их формирования из белого шума и белой последовательности. Получила дальнейшее развитие методика оценки погрешностей БИНС на коротком временном интервале по значениям инструментальных погрешностей инерциальных сенсоров без моделирования алгоритма БИНС, при этом доказано, что МЭМС гироскопы со временем накапливают значительно большие погрешности определения параметров движения и ориентации в сравнении с акселерометрами такого же класса точности.

Разработана методика оценки минимального значения дисперсии погрешности оценивания постоянной составляющей вариации Алана методом усреднения и определения оптимального времени усреднения, что важно при калибровании инерциальных сенсоров и позволяет эффективно идентифицировать структуру шумов в канале СИ. Детализирована модель погрешностей БИНС при определении скорости и координат МР и показано, что их точность определяется погрешностями ориентации, а величина погрешностей БИНС зависит от динамики движения объекта.

Предложено определять эквивалентные параметры емкостных МЭМС сенсоров по результатам измерения угла фазового сдвига и отношения амплитуд напряжений на выходе измерительного преобразователя (патенты Украины на изобретение №57135 и №57836). Получил дальнейшее развитие фазочастотный метод измерения амплитуды переменного напряжения и отношения амплитуд таких напряжений, при этом погрешности разработанных СИ в основном определяются точностью измерения (или преобразования) временных интервалов. Усовершенствована методика выбора оптимальной частоты дискретизации сигналов сенсоров и исполнительных устройств в системе управления МР с учётом их структурных связей, что позволяет получить оптимальную программу опроса. Разработана методика определения параметров паразитной фазовой модуляции при модуляции амплитуды входного сигнала полосового фильтра (ПФ) по разным законам при его расстройке.

Разработаны два варианта реализации инерциальных микросистем ориентации на основе фильтра Калмана, которые прошли испытания и показали устойчивое функционирование при длительной эксплуатации, а также ультразвуковой дальномер системы технического зрения МР с повышенной точностью оценки параметров движения за счёт учёта показаний сенсоров климатических параметров.

Разработана, научена и проанализирована искусственная нейронная сеть для определения расстояния МР до препятствия, которая наилучшим образом учитывает характер и сложность взаимосвязи между информационными параметрами. Разработана методика определения корректирующих коэффициентов для инерциального измерительного модуля и магнитометра, определяемых в процессе калибрования и используемых при интеграции в программный код вычислителя при определении их выходных сигналов. Проведены экспериментальные исследования разработанных СИ и калибровка инерциальных сенсоров, которые подтверждают адекватность разработанных теоретических положений и эффективность предложенных методов.

**Ключевые слова:** ускорение, приборная система, мобильный робот, акселерометр, инерциальный сенсор, бесплатформная инерциальная навигационная система, оценка параметров движения, вариация Алана, фильтрация сигналов, калибровка.

## ABSTRACT

**Rudyk A.V. Scientific foundations and principles of constructing an instrument system for measuring the acceleration of a mobile robot.** – Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Engineering in specialty 05.11.01 – instruments and methods for measuring mechanical quantities. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2018.

In the dissertation is solved the scientific-applied problem of increasing the accuracy of measuring the acceleration of the mobile robot (MR) instrument system due to the development of new methods and measuring instrument (MI).

The method of determining the parameters of the motion of the MR with the averaging of the coordinate codes in the interval of time, the effectiveness of which depends on the number of coordinates used for calculating, has been further developed. The mathematical models of the influence of working conditions (environment) on the MI coefficient of sensitivity and the dependence of ultrasonic velocity in the air on the group of climatic factors and wind speed are proposed. The generalized equation of errors of the SINS accelerometers is detailed, the components of the random error of accelerometers are analyzed and the models of their formation from white noise and white sequence are presented. The method of estimating the SINS errors in the short time interval on the values of instrumental errors of inertial sensors without simulation of the SINS algorithm has been further developed. The method of estimation of the minimum value of the error variance of constant component estimation of the Allan variation method of averaging and determination of optimal averaging time is developed. It is proposed to determine the equivalent parameters of capacitive MEMS sensors based on the measurement results of the phase shift angle between the voltage at the converter output and the ratio of amplitudes of these voltages. The phase-frequency measuring method of the amplitude and the ratio of the amplitude of the alternating voltages has been further developed. The method of selecting the optimum sampling frequency of sensors and actuators signals in the control system of MR with the consideration of their structural connections is improved.

An artificial neural network for the determine the distance of the MR to the obstacle, which takes into account the nature and complexity of the relationship between the information parameters, is developed, trained and analyzed. Experimental investigations of created MI and calibration of inertial sensors have been carried out, which confirm the adequacy of the developed theoretical positions and the effectiveness of the proposed methods.

**Keywords:** acceleration, device system, mobile robot, accelerometer, inertial sensor, strapdown inertial navigation system (SINS), estimation of parameters of motion, Allan variation, signal filtering, calibration.